

Christian Mannigel

AUFBAU UND EINFAHREN EINES
BRUCHMECHANISCHEN PRÜFSTANDES

eingereicht als

BACHELORARBEIT

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fakultät Maschinenbau

Mittweida, 2011

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Peter Hübner

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Ulrike Hähnel

Die vorgelegte Arbeit wurde verteidigt am: 27.04.2011

Bibliografische Angaben:

Christian Mannigel:

Aufbau und Einfahren eines bruchmechanischen Prüfstandes – 2011. 63 S.

Mittweida, Hochschule Mittweida (FH), University of Applied Sciences,

Fakultät Maschinenbau, Bachelorarbeit, 2011

Referat:

Ziel der Bachelorarbeit ist es, eine systematische Vorgehensweise zur Durchführung bruchmechanischer Versuche zu entwickeln. Dies beinhaltet den Aufbau der Prüfvorrichtung, den Versuchsablauf sowie die Auswertung der gewonnenen Ergebnisse.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
Formelzeichenverzeichnis.....	VIII
1 Einleitung und Aufgabenstellung	1
2 Theoretische Grundlagen	2
2.1 Konzepte der Bruchmechanik	2
2.1.1 Linear-elastische Bruchmechanik.....	2
2.1.2 Konzept der Spannungsintensität.....	3
2.1.3 LEBM und Kleinbereichsfließen	4
2.1.4 Fließbruchmechanik	5
2.1.4.1 CTOD-Konzept	6
2.1.4.2 J-Integral-Konzept.....	8
2.2 Zu prüfender Werkstoff	9
2.2.1 Herstellung von ADI-Gusswerkstoffen.....	10
2.2.3 Eigenschaften von ADI	13
2.2.4 Anwendung und Bearbeitung von ADI.....	13
3 Konstruktion der Prüfvorrichtung und Tieftemperaturkammer	15
3.1 Anforderungen an die Prüfvorrichtungen	15
3.2 Prüfvorrichtung 3-PB-Probe	15
3.3 Konstruktive Merkmale der Prüfvorrichtung	17
3.4 Hilfsvorrichtungen	19
3.5 Tieftemperaturkammer.....	21
4 Dynamische Risserzeugung.....	22
4.1 Aufbau der Resonanzprüfmaschine	22
4.2 Probenform	23
4.3 Bezeichnung der 3-Punkt-Biegeproben	24
4.4 Theoretische Grundlagen der Anrisserzeugung.....	25
4.4.1 Berechnung des Geometriefaktors	25
4.4.2 Berechnung des Spannungsintensitätsfaktors	26
4.4.3 Ermittlung der Kräfte.....	27

4.5	Versuchsdurchführung.....	29
4.6	Vermessung der Risslänge.....	31
5	Statische Versuche.....	32
5.1	Theoretische Grundlagen.....	32
5.2	Versuchsvorbereitung.....	34
5.3	Versuchsdurchführung.....	34
5.4	Versuchsauswertung.....	37
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	42
	Literaturverzeichnis.....	44
	Anhangsverzeichnis.....	45
	Anhang.....	46
	Selbstständigkeitserklärung.....	63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Rissöffnungsmoden	3
Abbildung 2: Abhängigkeit des kritischen Spannungsintensitätsfaktors von der Bauteildicke	4
Abbildung 3: Form der plastischen Zone	5
Abbildung 4: a) Rissabstumpfung mit Risseinleitung; b) Definition der Rissöffnung	6
Abbildung 5: Definition des J-Integrals.....	8
Abbildung 6: Gusseisen mit Kugelgraphit in ferritischem Grundgefüge	10
Abbildung 7: Gefüge ADI EN-GJS-1000-5.....	10
Abbildung 8: Schematische Temperaturführung zur Herstellung von ADI	12
Abbildung 9: ADI-Marktverteilung in Nordamerika	14
Abbildung 10: Prüfvorrichtung 3-PB-Probe	16
Abbildung 11: Aufnahme der Prüfvorrichtung an der Resonanzprüfmaschine	18
Abbildung 12: Adapterstück UPM Druckstempel	18
Abbildung 13: Adapterstück UPM Grundplatte	19
Abbildung 14: Lehre zum Ausrichten der Prüfvorrichtung	19
Abbildung 15: Lehre zur Probenausrichtung	20
Abbildung 16: Anwendung der Messschneidenlehre	21
Abbildung 17: Tieftemperaturkammer.....	21
Abbildung 18: Aufbau der Resonanzprüfmaschine.....	22
Abbildung 19: Maße der 3-PB-Probe und CT-Probe	23
Abbildung 20: Probenbezeichnung	24
Abbildung 21: Probenbezeichnung	24
Abbildung 22: Kraft-Kerbaufweitungskurve, schematisch dargestellt	32
Abbildung 23: Risswiderstandskurve	33
Abbildung 24: Einlegen der 3-PB-Probe an der UPM.....	34
Abbildung 25: Kühlkammer mit Thermoelement und COD-Clip	36

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: ADI-Güteklassen	11
Tabelle 2: Umwandlungszeiten der Güteklassen.....	12
Tabelle 3: Probenabmessung der 3-PB-Probe und CT-Probe	23
Tabelle 4: Parameter zur Kräfteberechnung	27
Tabelle 5: Ergebnistabelle der Maximal- und Amplitudenkräfte	28
Tabelle 6: Ergebnistabelle Ober-, Unter-, Mittellastberechnung	29
Tabelle 7: Angabe der Proben im Programm "EMOTION II"	30
Tabelle 8: Übersicht Laststufen und Frequenzdifferenz	30
Tabelle 9: Praktische Versuchsergebnisse der Anrisserzeugung	31
Tabelle 10: Werte für Gültigkeitskriterium	41

Abkürzungsverzeichnis

3-PB-Probe	3-Punkt-Biege-Probe
ADI	Austempered Ductile Iron
CAD	Computer Aided Design
COD	Crack Opening Displacement
Ni-Cr/Ni	Nickel-Chrom / Nickel Thermoelement
CTOD	Crack Tip Opening Displacement
DIN	Deutsches Institut für Normung
EDZ	Ebener Dehnungszustand
EN	Europäische Norm
ESZ	Ebener Spannungszustand
EVZ	Ebener Verzerrungszustand
Fa.	Firma
FE-C	Eisen-Kohlenstoff
GJS	Gusseisen mit Kugelgraphit
Gl	Gleichung
HRC	Härte nach Rockwell
K	Kokillenguss
LEBM	Linear-elastische-Bruchmechanik
M_f	Martensit-Endtemperatur
M_s	Martensit-Starttemperatur
PTFE	Polytetrafluorethylen (Teflon)
RT	Raumtemperatur
S	Sandguss
SENB	Single edge notched bend
UPM	Universalprüfmaschine

Formelzeichenverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
a	mm	Risslänge
a_0	mm	Anfangsrisslänge
a_{eff}	mm	Effektive Risslänge
$a_{notched}$	mm	Mechanischer Kerb
A	%	Bruchdehnung
B	mm	Proben- bzw. Bauteildicke
B_e	mm	berechnete Probenbreite
B_n	mm	Probenbreite mit Seitenkerben
C	mm/kN	Compliance
d_n	1	Faktor, abhängig vom Verfestigungs- exponenten und Spannungszustand
E	MPa	Elastizitätsmodul
F	N	Kraft
f	mm	Durchbiegung
$f_1\left(\frac{a}{W}\right)$	1	Risskonfiguration / Geometriefaktor
F_a	N	Lastamplitude
F_m	N	Mittellast
F_{max}	N	Maximalkraft
F_o	N	Oberlast
F_u	N	Unterlast
$g_3\left(\frac{a}{W}\right)$	1	Risskonfiguration / Geometriefaktor
J_{IC}	N/m	Kritischer Wert des J-Integrals
$J_{\max 1,2,3}$	N/mm	maximale Werte des J-Integrals
K_{IC}	$\text{MPa}\sqrt{m}$	Kritische Bruchzähigkeit Mode I
K_{IIc}	$\text{MPa}\sqrt{m}$	Kritische Bruchzähigkeit Mode II
K_{IIIc}	$\text{MPa}\sqrt{m}$	Kritische Bruchzähigkeit Mode III
K_{eff}	$\text{MPa}\sqrt{m}$	Effektiver Spannungsintensitätsfaktor
K_C	$\text{MPa}\sqrt{m}$	Kritische Bruchzähigkeit
K_{max}	$\text{MPa}\sqrt{m}$	Maximale Bruchzähigkeit
K_Q	$\text{MPa}\sqrt{m}$	vorläufiger K_{IC} -Wert

m	1	Faktor, abhängig vom Spannungszustand
r_{pl}	mm	Radius der plastischen Zone
R	1	Spannungsverhältnis
R_a	μm	Oberflächenrauigkeit
R_m	MPa	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	MPa	0,2 %-Dehngrenze
S	mm	Rollenabstand der 3-PB-Vorrichtung
t_{u1}	min	Isotherme Haltezeit 1
t_{u2}	min	Isotherme Haltezeit 2
t_{u3}	min	Isotherme Haltezeit 3
t	s	Zeit
T	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
u	1	Verschiebungsvektor
V	mm	Kerbaufweitung
V_e	mm	elastischer Anteil der Kerbaufweitung
V_{m1}	mm	crack-mouth opening displacement
V_p	mm	plastischer Anteil der Kerbaufweitung
W	mm	Probenhöhe
W_e	MPa	Elastische Dehnungsenergiedichte bzw. auf Volumen bezogene Formänderungsarbeit
X	mm	Schneidplattendicke
Γ	1	geschlossener Integrationsweg (Verbindung von unteren und oberen Rissufer)
Δa	mm	stabile Rissverlängerung
Δa_{max}	mm	maximale stabile Rissverlängerung
ΔF	N	Schwingbreite
Δf	Hz	Frequenzdifferenz
dA	mm^2	Änderung der Fläche
ds	mm	Wegeelement
δ	mm	Rissöffnung / CTOD
δ_{45}	mm	CTOD-Wert, Schnittpunkt im Winkel von 45°
δ_C	mm	Kritische Rissöffnung
$\delta_{\max 1,2,3}$	mm	maximale δ -Werte
σ_F	MPa	Fließspannung
ν	1	Poisson-Konstante
σ	MPa	Nennspannung

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Mit Beginn der Industrialisierung Anfang des 19. Jahrhunderts gab es in vielen Bereichen des Maschinen- und Anlagenbaus sowie im Stahl- und Schiffbau große technische Fortschritte. Dies brachte allerdings auch eine Vielzahl von neuen Problemen mit sich, mit denen sich auseinandergesetzt werden musste. Grund dafür waren eine Reihe von schwerwiegenden Unglücken mit Schwerverletzten und Toten. So kamen allein in England im 19. Jahrhundert mehr als 1500 Menschen ums Leben. Fortan beschäftigten sich Ingenieure und Wissenschaftler mit der Untersuchung von Versagensfällen in Material und Konstruktion. Es entwickelte sich das Feld der Bruchmechanik, die sich mit den werkstoffphysikalischen Ursachen von Brüchen und deren Vermeidung beschäftigt [Blumenauer & Pusch, 1993, S. 13 ff].

In Anlehnung an die bereits vorhandenen theoretischen Grundlagen ist das Ziel dieser Bachelorarbeit, einen bruchmechanischen Prüfstand zu konzipieren und aufzubauen. Das erste Teilgebiet befasst sich mit dem Einbringen eines zyklischen Ermüdungsanrisses an dem Resonanzprüfstand der Fa. Sinco Tec Bauteil-Prüftechnik GmbH. Der Aufgabenschwerpunkt lag dabei in der Konstruktion und Verbesserung einer Vorrichtung zur Erzeugung des Ermüdungsanrisses und der Versuchsdurchführung. Das zweite Teilgebiet beinhaltet den Aufbau und Test der 3-Punkt-Biegevorrichtung an der Universalprüfmaschine (UPM) Shimadzu AGG 100 kN. Nach dem erfolgreichen Einrichten der Prüfmaschine ist der 3-Punkt-Biegeversuch an SENB-Proben aus GJS-800-8, GJS-1000-5 und GJS 1200-3 unter Anwendung der Einprobentechnik bzw. des Teilentlastungsverfahrens durchzuführen. Während der Versuche wird unter anderem die Durchbiegung f und die Kerbaufweitung V mit Hilfe eines COD-Clips zur Ermittlung der bruchmechanischen Kennwerte K_{IC} , dem J-Integral und dem CTOD-Wert δ (Crack Tip Opening Displacement) gemessen. Eine weitere Aufgabe ist das Vermessen der Risslängen auf den Bruchflächen mit Hilfe eines Stereomikroskopes. Zudem sollen die Proben bei Tieftemperatur getestet werden. Dazu ist die Konstruktion und der Aufbau einer Temperiereinrichtung als weiterer Aufgabenschwerpunkt zu nennen.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Konzepte der Bruchmechanik

Um Vorhersagen über das Versagen von Bauteilen und Proben treffen zu können, wurde eine Reihe von Konzepten entwickelt. Es lassen sich die Konzepte der linear-elastischen Bruchmechanik (LEBM), der LEBM mit Kleinbereichsfließen und der Fließbruchmechanik unterscheiden. Diese gelten für das Verformungsverhalten rissbehafteter Bauteile bei quasistatischer Beanspruchung. Der Trennvorgang eines Festkörpers, welcher als Bruch bezeichnet wird, kann makroskopisch gesehen in zwei grundlegende Arten eingeteilt werden. Zum Ersten kann das Material durch einen spröden Bruch versagen. Typische Materialien wären Glas, Keramik und Beton. Auch können Metalle bei tiefen Temperaturen durch Sprödbbruch schlagartig versagen. Zum Zweiten versagen Bauteile durch einen duktilen Bruch. Dieser kommt häufig bei Metallen im Bereich normaler und höherer Temperaturen vor. Brüche, bei denen sowohl spröde als auch duktile Anteile auftreten, werden als Mischbrüche bezeichnet [Blumenauer & Pusch, 1993, S. 52 f].

2.1.1 Linear-elastische Bruchmechanik

Durch eine quantitative Erfassung von angerissenen Bauteilen als Folge einer instabilen Rissausbreitung ist das Konzept der linear-elastischen Bruchmechanik möglich. Eine Anwendung des LEBM-Konzeptes setzt eine linear-elastische Verformung bis zum Bruch voraus. Da aber an der Rissspitze immer eine irreversible Verformung stattfindet, muss darauf geachtet werden, dass der Bereich der plastischen Verformung an der Rissspitze (plastische Zone) im Verhältnis zu den Bauteilabmessungen klein bleibt. Daher ist dieses Konzept hauptsächlich für hochfeste und spröde Werkstoffe anzuwenden [Blumenauer & Pusch, 1993, S. 52 f].

2.1.2 Konzept der Spannungsintensität

Beim Konzept der Spannungsintensität geht man davon aus, dass es ab einer bestimmten Spannungskonzentration eines rissbehafteten Bauteils zum Rissfortschritt kommt. Der Spannungsintensitätsfaktor K , welcher ein Maß für die Intensität des Spannungsfeldes in der Nähe der Risspitze ist, hängt von der Nennspannung σ , der Risslänge a sowie der Risskonfiguration $f(a/W)$ (siehe Anhang A) ab und wird nach folgender Funktion berechnet:

$$K = \sigma * \sqrt{(2 * a * \pi)} * f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (2.1)$$

W kennzeichnet dabei die Probenhöhe [Willnich, 2008, S.4 f].

In Abhängigkeit der auftretenden Belastungen bzw. Rissöffnungsmoden sind die Spannungsintensitätsfaktoren K_I , K_{II} und K_{III} zu unterscheiden (siehe Abbildung 1).

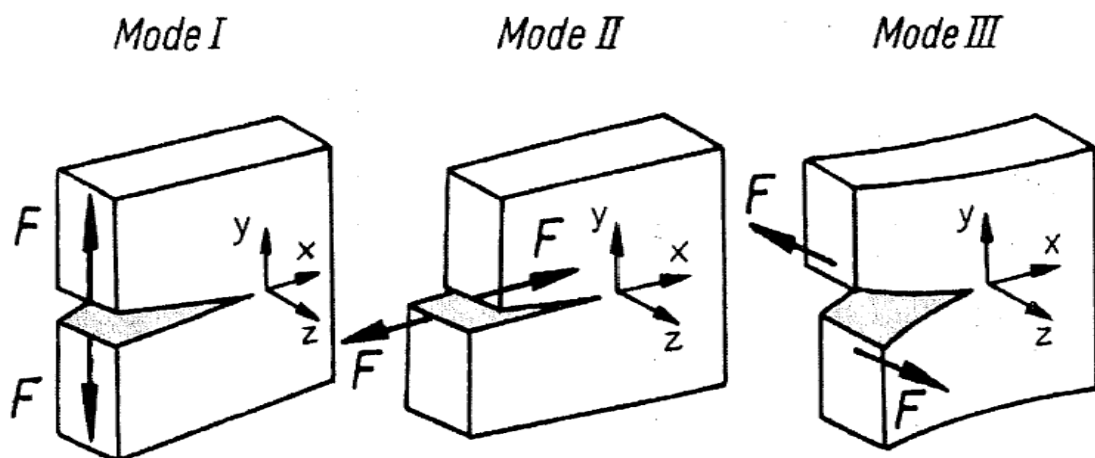


Abbildung 1: Rissöffnungsmoden

[Blumenauer & Pusch, 1993, S. 54]

Mode I: symmetrische Rissöffnung, Zugbeanspruchung

Mode II: Schubbeanspruchung parallel zur Rissebene

Mode III: Schubbeanspruchung parallel zur Rissfront

[Willnich, 2008, S.5]

Voraussetzung für einen instabilen Rissfortschritt ist, dass ein kritischer Wert des Spannungsintensitätsfaktors im ebenen Spannungszustand (ESZ) überschritten werden muss. Dieser wird als Bruch- bzw. Risszähigkeit bezeichnet. Der kritische Spannungsintensitätsfaktor ist von der Bauteil- bzw. Probendicke abhängig, da der ebene Dehnungszustand (EDZ) nur in dicken Bauteilen bzw. Proben erreicht wird. Die kritischen Werte K_{IC} , K_{IIC} und K_{IIIC} sind bei diesen Bauteil- bzw. Probendicken geometrieunabhängig und können als Werkstoffkennwerte angesehen werden (siehe Abbildung 2).

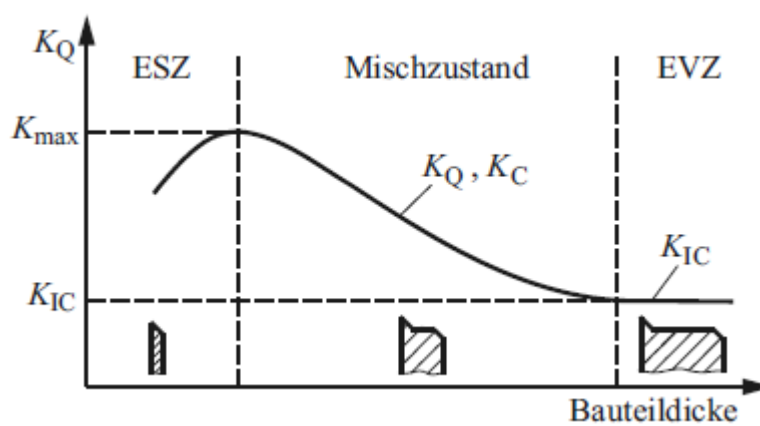


Abbildung 2: Abhängigkeit des kritischen Spannungsintensitätsfaktors von der Bauteildicke

[Weißbach, 2007, S. 143]

2.1.3 LEBM und Kleinbereichsfließen

"Das bei der LEBM betrachtete linear-elastische Verhalten eines Werkstoffes ist eine idealisierte Modellvorstellung, da es bei Spannungserhöhung, auch bei spröden Werkstoffen, zur Ausbildung einer plastischen Zone vor der Rissspitze kommt. Unter der Bedingung, dass diese plastische Zone (Abbildung 3) gegenüber der Bauteilabmessung und dem Querschnitt vor dem Riss klein bleibt, kann man einen effektiven Spannungsintensitätsfaktor

$$K_{eff} = \sigma * \sqrt{(2 * a_{eff} * \pi)} * f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (2.2)$$

$$\text{mit } K_{eff} = a + r_{pl} \quad (2.3)$$

$$\text{und } r_{pl} = \frac{1}{2\pi} * \left(\frac{K_I}{R_e}\right)^2 \text{ für den ESZ} \quad (2.4)$$

$$\text{bzw. } r_{pl} = \frac{1}{2\pi} * \left(\frac{K_I}{R_e}\right)^2 * (1 - 2\nu)^2 \quad (2.5)$$

für den EDZ ermitteln" [Willnich, 2008, S.6].

Dabei gibt r_{pl} den Radius der plastischen Zone, R_e die Streckgrenze und ν die Poissonsche Konstante an.

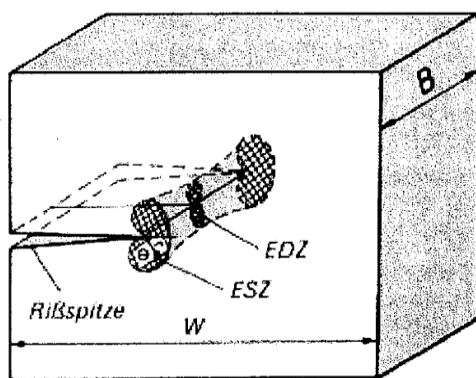


Abbildung 3: Form der plastischen Zone

[Blumenauer & Pusch, 1993, S. 65]

Sollte jedoch die Verformung der plastischen Zone $r_{pl} = 0,025a$ übersteigen, so kann das Konzept der LEBM mit Kleinbereichsfließen nicht mehr angewendet werden [Blumenauer & Pusch, 1993, S. 66].

2.1.4 Fließbruchmechanik

Wird die plastische Zone vor der Risspitze im Verhältnis zum Bauteil oder der Probe zu groß ($r_{pl} \geq 0,025a$), muss die Fließbruchmechanik angewendet werden. Bei duktilen Werkstoffen treten vor der Risspitze ausgedehnte plastische Bereiche auf. Diese Werkstoffe finden sich sehr häufig in industriellen Anwendungen wieder. Um die Bruchmechanik technisch nutzen zu können, wurden das CTOD- und J-Integral-Konzept entwickelt, welche ineinander überführbar sind. Diese beiden Konzepte werden in den Kapiteln 2.1.4.1 und 2.1.4.2 näher erläutert [Blumenauer & Pusch, 1993, S. 67].

2.1.4.1 CTOD-Konzept

Bei duktilem Werkstoffverhalten geht das CTOD-Konzept davon aus, dass der Bruchvorgang von der plastischen Verformung an der Risspitze kontrolliert wird. Unter Belastung findet eine Rissöffnung δ im Rissöffnungsmodus I statt, die auch als Risspitzenverschiebung (CTOD) bezeichnet wird. Als Folge der zunehmenden plastischen Verformung bei weiterer Belastung kommt es zur Abstumpfung der Risspitze (siehe Abbildung 4). Es wird ein kritischer Wert der Rissöffnung erreicht, welcher als δ_c bezeichnet wird und bei Überschreiten zum Rissfortschritt führt. In Abhängigkeit vom Werkstoff und den Beanspruchungsbedingungen kann dieser Vorgang sowohl stabil als auch instabil vonstattengehen. Mit dem Rasterelektronenmikroskop kann die Rissöffnung direkt bestimmt werden. Eine andere Methode ist die Infiltrationsmethode. Prinzip hierbei ist das Ausfüllen der Risspitze mittels Kunstharz. Der erhaltene Abdruck kann nach der Zerstörung der Probe vermessen werden. "Für numerische Berechnungen hat sich die Definition eines CTOD-Wertes δ_{45} als Schnittpunkt der Rissufer mit den unter einem Winkel von 45° von der Risspitze ausgehenden Geraden als vorteilhaft erwiesen" [Blumenauer & Pusch, 1993, S. 67].

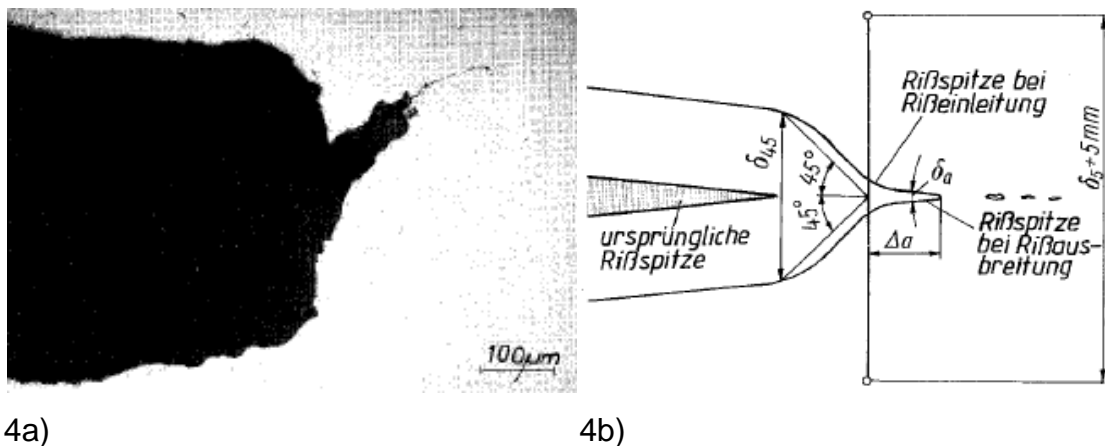


Abbildung 4: a) Rissabstumpfung mit Risseinleitung; b) Definition der Rissöffnung
[Blumenauer & Pusch, 1993, S. 68]

- Zusammenhang zwischen Rissöffnung δ , Risslänge a und Spannung σ

Voraussetzung:

$$\sigma_F = \frac{R_e + R_m}{2} \quad (2.6)$$

und

$$\frac{\sigma}{\sigma_F} < 0,6 \quad (2.7)$$

Sind diese beiden Voraussetzungen erfüllt, ergibt sich folgende Näherung:

$$\delta = \frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot a}{E \cdot \sigma_F} \quad (2.8)$$

"Im Gültigkeitsbereich der LEBM mit Kleinbereichsfließen besteht der Zusammenhang:

$$\delta = m \cdot \frac{K_I^2}{E \cdot \sigma_F} \quad (2.9)$$

wobei $m=1$ für ESZ.

Das COD-Konzept hat vor allem für die Werkstoffauswahl, Qualitätsüberwachung und Fehlerbewertung von Schweißkonstruktionen aus normal- und hochfesten Baustählen praktische Anwendung gefunden" [Blumenauer & Pusch, 1993, S. 68].

2.1.4.2 J-Integral-Konzept

Eine wesentliche Erweiterung der Fließbruchmechanik ist das J-Integral. Es wird als Linienintegral mit einem um die Risspitze geschlossenen Integrationsweg (siehe Abbildung 5)

$$J = \int_{\Gamma} (W_e * dy - \sigma * \frac{du}{dx} * ds) \text{ definiert,} \quad (2.10)$$

wobei W_e die auf das Volumen bezogene Formänderungsarbeit ist.

σ	Spannungsvektor
u	Verschiebungsvektor
ds	Wegelement
Γ	geschlossener Integrationsweg, der das untere mit dem oberen Rissufer verbindet

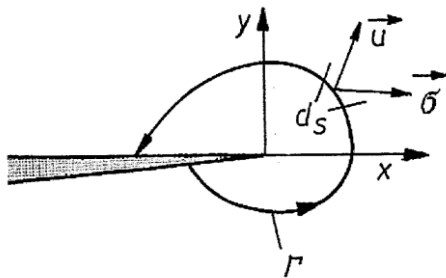


Abbildung 5: Definition des J-Integrals

[Blumenauer & Pusch, 1993, S. 69]

Nach dem Energieerhaltungssatz sollte der Integrand Null werden, wenn keine Unstetigkeiten vorhanden sind. Die Energie innerhalb eines geschlossenen Integrationsweges ist Null. Sollte sich ein Riss gebildet haben, so ist das J-Integral $\neq 0$, aber unabhängig vom Integrationsweg. Das J-Integral kann auch über die Änderung der potentiellen Energie dU vor der Risspitze bestimmt werden. Dabei bezieht sich dU auf die Rissfläche dA .

$$J = - \frac{dU}{dA} \quad (2.11)$$

und für $dA = B * da$, wobei B die Proben- bzw. Bauteildicke ist.

$$J = -\frac{1}{B} * \frac{dU}{da} \quad (2.12)$$

Wenn es zur Rissausbreitung kommt, ist der kritische Wert J_{IC} des J-Integrals erreicht. Für eine Bruchsicherheitsbewertung im Gültigkeitsbereich der LEBM lassen sich die J_{IC} -Werte in Bruchzähigkeitswerte nach der Beziehung

$$K_{IC}^J = \sqrt{\frac{E * J_{IC}}{1 - \nu^2}} \quad (2.13)$$

umrechnen. Mit dem CTOD-Konzept besteht ein Zusammenhang:

$$\delta_{45} = d_n * \frac{J}{\sigma_F} \quad (2.14)$$

Für den ESZ kann der Faktor $d_n \approx 0,5$ angenommen werden. Dieser ist vom Verfestigungsexponenten und vom Spannungszustand abhängig [Blumenauer & Pusch, 1993, S. 69 ff].

2.2 Zu prüfender Werkstoff

Die stetig steigenden Anforderungen an Konstruktionswerkstoffe zwingen Konstrukteure dazu, neue Materialien zu verwenden, die hochfest und gleichzeitig zäh sein sollen. Da die meisten Werkstoffe gute Zähigkeitswerte bei geringer Festigkeit oder eine hohe Festigkeit bei geringer Zähigkeit besitzen, gilt es, einen Werkstoff zu entwickeln, der diese beiden Eigenschaften möglichst gut kombiniert. Diesbezüglich hat sich in den letzten Jahren ADI-Gusseisen durchgesetzt. ADI, stehend für Austempered Ductile Iron, wird umgangssprachlich auch als bainitisches Gusseisen mit Kugelgraphit bezeichnet. Schon seit den 70er Jahren wurde ADI in den USA eingesetzt. Heutzutage werden in den USA und Kanada jährlich 120.000 Tonnen an ADI-Guss produziert, wogegen in Europa gerade mal 20.000 Tonnen produziert werden. Obwohl die erzielbaren Eigenschaften, Einsatzpotentiale und die Herstellung bekannt sind, werden diese hochleistungsfähigen Werkstoffe noch zu wenig genutzt [Wittwer & Rechsteiner, Dez. 2005, S. 4].

2.2.1 Herstellung von ADI-Gusswerkstoffen

Ausgangswerkstoff für ADI ist Gusseisen mit Kugelgraphit. Für die Herstellung von ADI ist eine mehrstufige und genaue Wärmebehandlung des Grundwerkstoffes erforderlich. Das Ziel der Wärmebehandlung ist es, ein Gefüge aus nadeligem Ferrit in einer mit Kohlenstoff übersättigten Austenitmatrix einzubetten. Es hat sich der Begriff Ausferrit durchgesetzt und ist mittlerweile auch in den Normen (DIN EN 1564) standardisiert. Für eine optimale Werkstoffqualität sollte die Bildung von Perlit unterbunden werden. In Abbildung 6 und Abbildung 7 ist die deutliche Veränderung des Gefüges durch die Wärmebehandlung zu erkennen.

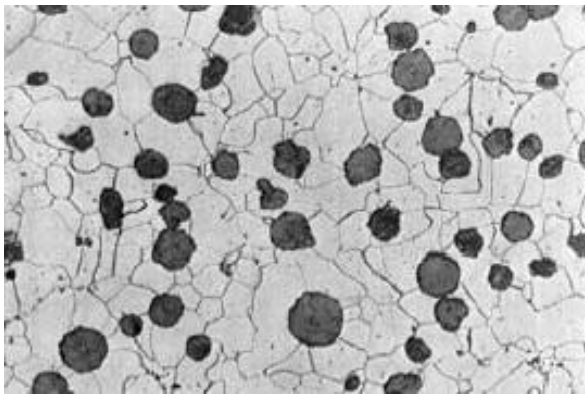


Abbildung 6:

Abbildung 6: Gusseisen mit Kugelgraphit in ferritischem Grundgefüge
[Weißbach, 2007, S. 194]

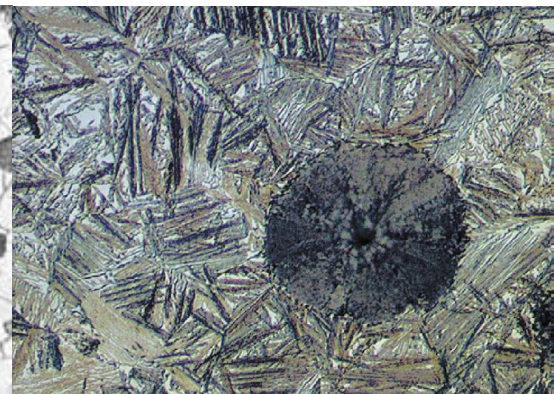


Abbildung 7:

Abbildung 7: Gefüge ADI EN-GJS-1000-5
[Gründling, 2003]

- **Zeit-Temperatur-Umwandlung**

Der Grundwerkstoff ist in der Regel EN-GJS-600-3. Der Wärmebehandlungszyklus für das gewünschte Gefüge besteht aus drei Phasen. In der ersten Phase wird der Werkstoff auf Austenitisierungstemperatur erwärmt. Diese liegt zwischen 840 und 940°C. Die anschließende Haltedauer auf Austenitisierungstemperatur hängt von der einzustellenden Anzahl der Graphitkugeln, der chemischen Zusammensetzung sowie von der Bauteilgeometrie ab. Die zweite Phase der Wärmebehandlung ist das Abschrecken auf Umwandlungstemperatur mit

dem Ziel, Ausferrit zu erhalten. Diese beträgt ca. 235...425°C. Die Abkühlung auf Ausferrit-Temperatur muss so rasch erfolgen, dass sich keine anderen Gefügebestandteile, wie Perlit, bilden (siehe Abbildung 8). Um das zu erreichen, wird im bewegten Salzbad abgeschreckt. Generell gilt, dass mit fallender Umwandlungstemperatur die Güte des Werkstoffes zunimmt. Die Umwandlungstemperatur wird über die Badtemperatur eingestellt. Tabelle 1 gibt die wichtigsten Werkstoffkennwerte der verschiedenen Güteklassen wieder [Wittwer & Rechsteiner, Dez. 2005, S. 5 f].

Tabelle 1: ADI-Güteklassen

Kurzbezeichnung	Zugfestigkeit R_m in N/mm ²	Dehngrenze $R_{p0,2}$ in N/mm ²	Bruchdehnung A in %
EN-GJS-800-8	800	500	8
EN-GJS-1000-5	1000	700	5
EN-GJS-1200-2	1200	850	2
EN-GJS-1400-1	1400	1100	1

[Bartels & Michelberger, 2006]

In der dritten Phase werden die Werkstücke isotherm im Salzbad auf Umwandlungstemperatur gehalten. Es beginnt die Bildung des nadeligen Ferrits. "Dieser α -Mischkristall im System Fe-C hat eine viel geringere Löslichkeit für Kohlenstoff als der Austenit" [Gründling, 2003]. Der überschüssige Kohlenstoff, der aus dem α -Mischkristall ausgeschieden worden ist, reichert sich im Austenit an und behindert ihn an der Ferritbildung. Eine genaue Haltedauer auf Umwandlungstemperatur ist wichtig, da bei einer zu frühen Abkühlung auf Raumtemperatur der Austenit nicht ausreichend stabilisiert wird und es zu einer Gefügeumwandlung in Martensit kommen kann. Die Gefahr der Werkstoffversprödung ist gegeben, da der Austenit untersättigt ist. Die gleiche Gefahr der Versprödung liegt vor, wenn die Haltedauer zu lang gewählt wurde. Die entstehende Übersättigung des Austenits führt zur Carbidgebildung. "Auf Umwandlungstemperatur wird das Gussstück so lange gehalten, bis die maximal mögliche Menge an stabilisiertem Austenit nach der anschließenden Abkühlung auf Raumtemperatur vorliegt" [Gründling, 2003].

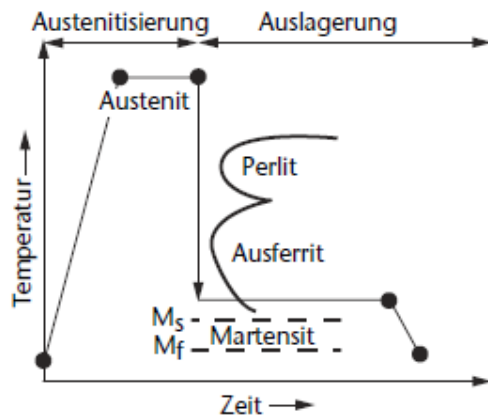


Abbildung 8: Schematische Temperaturführung zur Herstellung von ADI

[Bartels & Michelberger, 2006, S. 38]

Für die Versuche, die an der Hochschule Mittweida im Rahmen eines Forschungsprojektes durchgeführt werden sollen, wurden 3-Punkt-Biegeproben aus ADI der Güten GJS-800-8, GJS-1000-5 und GJS-1200-3 angefertigt. Für jede Güte wurden jeweils Proben im Sandguss- und Kokillengussverfahren und mit drei unterschiedlichen isothermen Haltezeiten hergestellt. Die statischen Versuche wurden bei Raumtemperatur (RT) und bei einer Temperatur von -40°C durchgeführt. Genauer wird im Kapitel 5 darauf eingegangen. Tabelle 2 gibt die Güteklassen mit den verschiedenen isothermen Haltezeiten wieder.

Tabelle 2: Umwandlungszeiten der Güteklassen

Werkstoff	isotherme Haltezeit t_{u1} in min	isotherme Haltezeit t_{u2} in min	Isotherme Haltezeit t_{u3} in min
EN-GJS-800-8	Charge 1	Charge 2	Charge 3
	8	16	90
EN-GJS-1000-5	Charge 4	Charge 5	Charge 6
	15	30	120
EN-GJS-1200-3	Charge 7	Charge 8	Charge 9
	12	30	120

2.2.3 Eigenschaften von ADI

Obwohl mittlerweile das große Potential, welches in ADI steckt, erkannt worden ist, kommt der Werkstoff jedoch noch recht wenig in Europa zur Anwendung. So besitzt ADI fast doppelt so hohe Festigkeitswerte bei gleicher Bruchdehnung wie herkömmliche Gusseisensorten. Dadurch eröffnen sich völlig neue Anwendungsgebiete für diesen Werkstoff. ADI dringt in die Bereiche von Stahlguss und Schmiedestahl ein. Grund dafür ist die Kombination aus hoher Festigkeit und Duktilität sowie einer hohen Verschleißbeständigkeit. "Die mit geschmiedetem Stahl vergleichbare Dauerfestigkeit lässt einen sicheren Langzeitbetrieb von Bauteilen zu" [Bargel & Schulze, 2005, S. 263]. Hinzu kommt noch ein gutes Dämpfungsvermögen sowie eine Gewichtsreduzierung um 10% im Vergleich zu Stahlguss und Schmiedestahl. Auch die besonders guten Gießeigenschaften und die geringe Lunkerbildung sind in Bezug auf die Gestaltung der Bauteilgeometrien nicht zu verachten. So können besonders filigrane und komplexe Strukturen gegossen werden. Der dadurch entfallene Schritt der mechanischen Nachbearbeitung bringt eine Kostenersparnis im Vergleich zu den anderen Werkstoffgruppen ein [Wittwer & Rechsteiner, Dez. 2005, S. 6].

2.2.4 Anwendung und Bearbeitung von ADI

ADI wird heutzutage hauptsächlich im Bereich des Fahrzeugantriebes eingesetzt. "Es handelt sich dabei neben diversen Befestigungs- und Steuerelementen sowie Zahnrädern vor allem um Verschleißteile" [Wittwer & Rechsteiner, Dez. 2005, S. 6]. Weiterhin kommt ADI überall dort zum Einsatz, wo starke Verschleißerscheinungen auftreten, zum Beispiel bei Bergbaumaschinen, Förderkübeln und Zahnkränzen für Rohrmühlen. "Zum Tragen kommt, dass sich der Widerstand gegen Verschleiß durch die Verfestigungsneigung des Austenits weiter erhöht" [Bargel & Schulze, 2005, S. 263]. Diese Eigenschaft bringt allerdings auch einen Nachteil. So sollte bei einer mechanischen Nachbearbeitung darauf geachtet werden, dass nicht zu viel Wärme durch den Zerspanprozess eingebracht wird. Grundsätzlich ist unter Beachtung der richtigen Auswahl der Schneidstoffe, Beschichtungen und Parameter für den Zerspanprozess eine mechanische Bearbeitung möglich. "Müssen jedoch große Materialmengen ab-

getragen werden, ist zu überlegen, ob bereits vor der Wärmebehandlung eine Grobbearbeitung erfolgen soll" [Wittwer & Rechsteiner, Dez. 2005, S. 6]. Allgemein sollte immer eine endkonturnahe Gussform angestrebt werden. Auch sehen Experten in der Zukunft einen weiter steigenden Bedarf für hochfeste, dünnwandige (< 3 mm Wanddicke) Werkstücke. Abbildung 9 gibt einen Überblick über die bisherigen Einsatzgebiete mit den entsprechenden Marktanteilen in Nordamerika wieder.

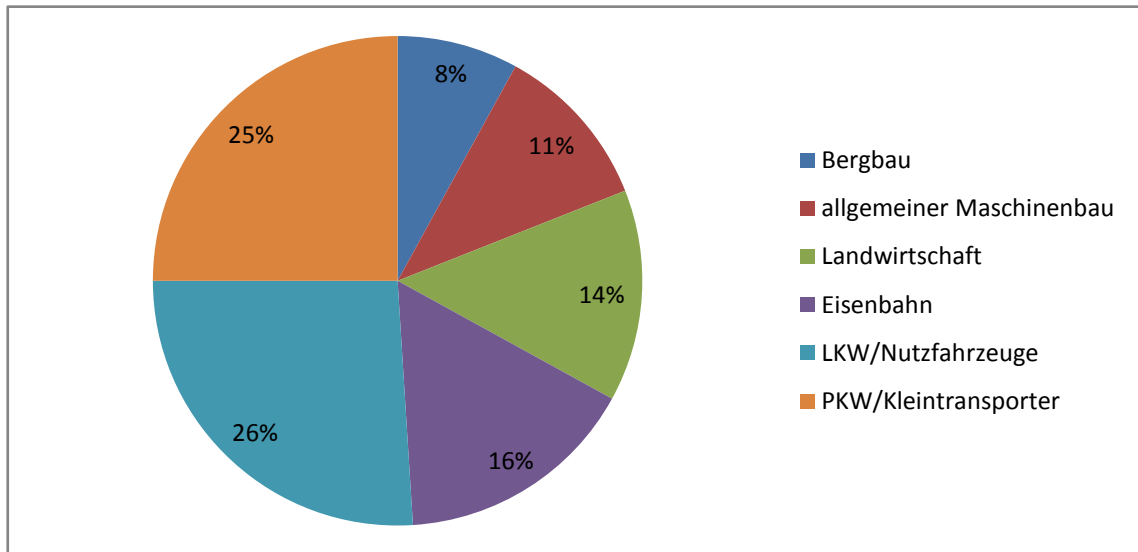


Abbildung 9: ADI-Marktverteilung in Nordamerika

[Klöpper, Schliephake, & Bartels, S. 4]

3 Konstruktion der Prüfvorrichtung und Tieftemperaturkammer

Ein Teil der Aufgabenstellung dieser Bachelorarbeit ist es, die Prüfvorrichtungen für die verschiedenen Prüfmaschinen zu konzipieren, fertigen zu lassen und aufzubauen. Bei den Prüfmaschinen handelt es sich zum einen um die Resonanzprüfmaschine der Fa. Sinco Tec, an dem die Ermüdungsanrisse eingebracht werden und zum anderen um die Universalprüfmaschine Shimadzu AGG 100 kN für die statischen Bruchmechanikversuche. Weiterhin soll in diesem Kapitel der Aufbau der Kühlvorrichtung und die Konstruktion der Tieftemperaturkammer dargestellt werden.

3.1 Anforderungen an die Prüfvorrichtungen

Da bruchmechanische Untersuchungen stattfinden, sollten die eventuellen Belastungen, welche bei den unterschiedlichsten Werkstoffen auftreten, berücksichtigt werden. Daher ist es notwendig, die Vorrichtung ausreichend zu dimensionieren und entsprechende Werkstoffe einzusetzen, um auch hochfeste Werkstoffe prüfen zu können. Weiterhin ist eine hohe Steifigkeit gefordert, da zum einen die Proben zyklisch belastet werden und zum anderen die Messabweichungen durch Verformung der Prüfvorrichtung klein gehalten werden sollen. Bei den Bruchmechanikversuchen werden 3-Punkt-Biege-Proben (3-PB-Proben) durch eine Kraft belastet, um eine Rissöffnung an einer definierten Stelle an der 3-PB-Probe zu erzeugen. Da bei der 3-PB-Probe der Abstand der Rollenauflage 80 mm betragen soll, ist es vorteilhaft, eine Messeinrichtung direkt an der Prüfvorrichtung anzubringen. Ebenfalls muss die Prüfvorrichtung konstruktiv so gestaltet sein, dass ein Wegaufnehmer (COD-Clip) problemlos an den Proben angebracht werden kann.

3.2 Prüfvorrichtung 3-PB-Probe

Für die Durchführung der Bruchmechanikversuche werden Prüfvorrichtungen für die Erzeugung der zyklischen Ermüdungsanrisse sowie für die statischen

Versuche benötigt. Um nach den in der ISO/FDIS 12135: 2002(E) geltenden Richtlinien einen 3-PB-Versuch durchführen zu können, ist es notwendig, eine Prüfvorrichtung zu entwickeln, die den allgemeinen Anforderungen der Norm entspricht. Dabei muss die Vorrichtung folgenden Kriterien entsprechen:

1. Die Parallelität der Auflagerrollen sollte gegen einander $\pm 0,002 W$ betragen, um ein exaktes Aufliegen der Probe zu gewährleisten
2. Die Oberflächenrauigkeit sollte $Ra = 0,8 \mu m$ sein
3. Die Auflagerrollen sowie der Druckstempel müssen eine Härte ≥ 40 HRC besitzen bzw. eine Festigkeit ≥ 1000 MPa.
4. Rollen sollen federnd gelagert sein, um die Reibung zu minimieren

Bei der Werkstoffauswahl für die Auflagerrollen, den Druckstempel sowie den Sicherungsbolzen im Druckstempel wurde der Kugellagerstahl 100Cr6 im gehärteten Zustand eingesetzt. Die resultierende Härte beträgt 62 ± 2 HRC, was den Anforderungen vollkommen genügt. Alle anderen Teile bestehen aus dem Vergütungsstahl 42CrMo4QT. Dieser besitzt ebenfalls Festigkeitswerte zwischen 1000 und 1200 MPa. Zum besseren Verständnis sind in Abbildung 10 alle 100Cr6-Teile blau gekennzeichnet. Da für die später folgenden Versuche eine Messung der Risslänge mittels Elektropotentialmethode vorgesehen ist, war eine weitere Anforderung, die Probe elektrisch von der Prüfvorrichtung abzuschirmen. Deshalb wurde entschieden, bei der Konstruktion elektrisch isolierende Schichten in die Prüfvorrichtung zu integrieren. Die Wahl fiel dabei auf eine 2 mm starke Hartpapierplatte (Pertinax®).

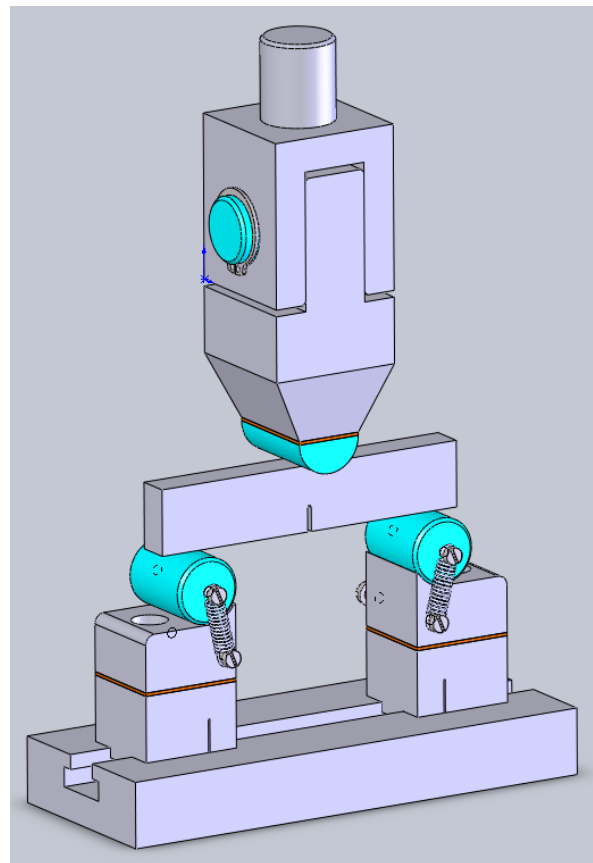


Abbildung 10: Prüfvorrichtung 3-PB-Probe

Vorteil dieses Werkstoffes ist neben der isolierenden Eigenschaft eine hohe Festigkeit sowie Formbeständigkeit. In Abbildung 10 sind diese Schichten braun gekennzeichnet. Für eine ebene Auflagefläche des Druckstempels wurde ein Gelenk im Stempel integriert, um eventuelle Ungenauigkeiten bei der Probenherstellung zu kompensieren. Ein vollständiger Kontakt des Stempels auf der Probe ist zwingend notwendig, da schon geringste Belastungsunterschiede zu einer ungleichen Kraftverteilung und demzufolge zu einer ungleichmäßigen Rissausbreitung führen können. Zusätzlich sind im unteren Teil der Rollenaufnahme Kerben eingefräßt worden. Die Kerben befinden sich im Lot zum Mittelpunkt der Rollen, um mittels Messlehren den Rollenabstand einstellen zu können. Die gesamte Prüfvorrichtung ist mit dem CAD-Programm SolidWorks 2010 erstellt worden. Mit der Fertigung der Teile wurde die Fa. Brand Werkzeug- und Maschinenbau GmbH in Öderan beauftragt. Die genauen Abmessungen der Teile sind im Anhang B als Technische Zeichnungen beigefügt.

3.3 Konstruktive Merkmale der Prüfvorrichtung

Nachdem die universelle 3-PB-Vorrichtung konstruktiv ausgereift war, galt es, die Schnittstellen für die Resonanzprüf- und Universalprüfmaschine zu entwickeln, da diese unterschiedliche Aufnahmen zur Befestigung der Vorrichtung erfordern. Da bei bruchmechanischen Untersuchungen aufgrund des Probenumfanges dynamische und statische Versuche oftmals parallel laufen, sind zwei Biegevorrichtungen mit jeweils für die Prüfmaschine dazugehörigen Aufnahmen hergestellt worden.

- **Aufnahmen für die Resonanzprüfmaschine POWER SWING NewLine MAG 20 kN**

Für eine sichere Verbindung zwischen Vorrichtung und Prüfmaschine wurde jeweils an der Unterseite der Grundplatte sowie an der Oberseite des Stempels ein metrisches ISO-Feingewinde M22x1 angebracht. Da die Prüfmaschine selbiges Linksgewinde besitzt, kann mittels Überwurfmutter gekontert werden. Dabei ist zu beachten, dass die Stirnflächen von Gewindebolzen und Kontaktfläche des Resonanzpulsators bündig aufeinander sitzen, um die erzeugten

Schwingungen übertragen zu können. In Abbildung 11 ist die Grundplatte mit Überwurfmutter sowie die Kraftmessdose zu sehen.



Abbildung 11: Aufnahme der Prüfvorrichtung an der Resonanzprüfmaschine

- Aufnahmen für die Universalprüfmaschine Shimadzu AGG 100 kN

Da die Universalprüfmaschine (UPM) vom Hersteller mit Spannbacken ausgerüstet ist, war es notwendig, sowohl für die Grundplatte als auch für den Druckstempel ein Adapterstück zu konstruieren (Abbildung 12 und 13). Beim Einspannen der Adapterstücke ist darauf zu achten, dass deren Kontaktflächen rechtwinklig zu den Einspannflächen sowie bündig mit den Spannbacken der Prüfmaschine anliegen. Resultierend daraus wird die senkrechte Einspannung der Prüfvorrichtung gewährleistet.

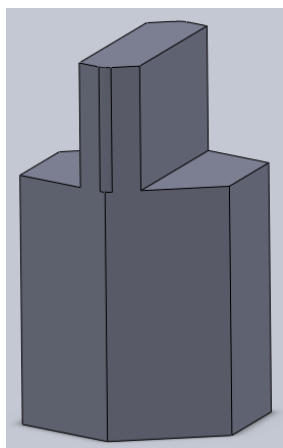


Abbildung 12: Adapterstück UPM Druckstempel

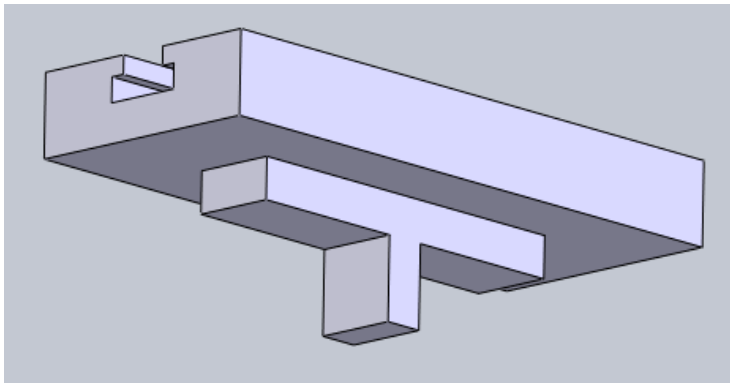


Abbildung 13: Adapterstück UPM Grundplatte

3.4 Hilfsvorrichtungen

Nachdem im vorherigen Punkt die Einzelheiten der Prüfvorrichtung erläutert wurden, sollen unter diesem Punkt noch die notwendigen Lehren für eine korrekte Ausrichtung der Vorrichtung und 3-PB-Proben dargestellt werden.

- **Lehre zur Ausrichtung der Prüfvorrichtung**

Die Lehre zur Ausrichtung der Prüfvorrichtung besitzt hauptsächlich zwei Aufgaben. Sie soll einerseits das Unter- und Oberteil der Vorrichtung in Axialrichtung der Auflagerrollen ausrichten und die Abstände zwischen Druckstempel und Auflagerrollen festlegen. Um Setzvorgänge bei den statischen Bruchmechanikversuchen zu verhindern, sollte vor Inbetriebnahme der ersten Probe eine Vorlast auf die gesamte Prüfvorrichtung gegeben werden. Diese sollte 10 kN für ADI-Stähle betragen. Die andere Aufgabe ist, diese Kraft zwischen Unter- und Oberteil übertragen zu können.

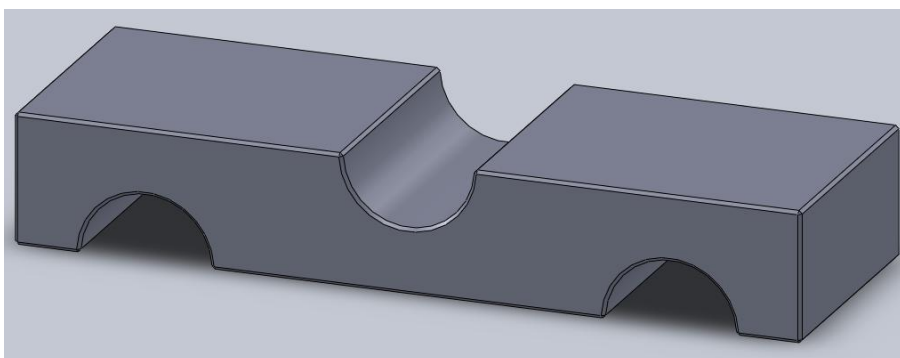


Abbildung 14: Lehre zum Ausrichten der Prüfvorrichtung

- **Lehre zur Probenausrichtung**

Für die korrekte Ausrichtung der 3-PB-Proben ist die Lehre in Abbildung 15 zu benutzen. Die Lehre wird von hinten auf die Auflagerrollen aufgesetzt und in Richtung Mitte der Rollen geschoben bis der Anschlag an den Stirnseiten der Auflagerrollen anliegt. Jetzt kann die 3-PB-Probe aufgesetzt werden. Die Probe wird an die Lehre angelegt. Zum mittigen Ausrichten befindet sich eine eingefräste Kerbe in der Lehre, die mit der Kerbe in der 3-PB-Probe identisch ist. Die Probe ist mittig ausgerichtet, wenn die beiden Kerben in einer Flucht stehen. Nun sollte mittels Druckstempel eine geringe Vorlast (300N) auf die Probe gegeben werden, damit diese fest aufliegt. Anschließend kann die Lehre wieder entfernt werden.

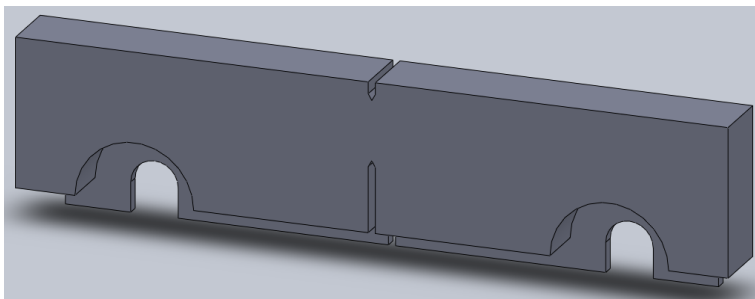


Abbildung 15: Lehre zur Probenausrichtung

- **Lehre für Messschneiden**

Da bei den statischen Bruchmechanikversuchen unter anderem die Kerbaufweitung mit Hilfe eines COD-Clips gemessen wird, müssen Messschneiden an der Probe befestigt werden. Bei diesem Forschungsprojekt wurden diese Messschneiden (in Abbildung 16 blau gekennzeichnet) für die Raumtemperaturversuche angeklebt. Laut ISO/FDIS 12135: 2002(E) beträgt der Abstand der Messschneiden 2 mm. Durch Einlegen der Messschneidenlehre (in Abbildung 16 rot gekennzeichnet) in den eingefrästen Kerb ist es möglich, die Schneidplatten im Abstand anzulegen und aufzukleben.

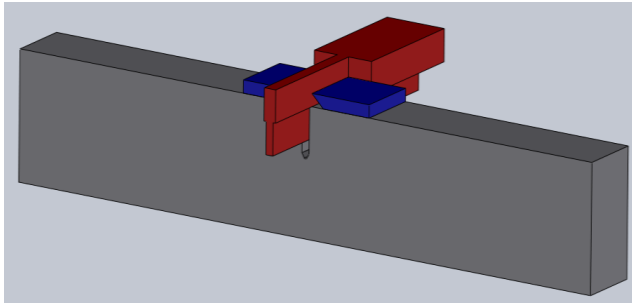


Abbildung 16: Anwendung der Messschneidenlehre

3.5 Tieftemperaturkammer

Um die 3-PB-Proben auch unter tiefen Temperaturen testen zu können, musste eine Kühlkammer entwickelt werden. Als Kühlmedium soll flüssiger Stickstoff verwendet werden. Die wichtigste Forderung bestand darin, dass der Aufbau der Vorrichtung sowie das Einrichten der Proben von einer Person durchgeführt werden kann. Weiterhin sollte neben der Prüfvorrichtung, die in der Kühlkammer integriert ist, auch Platz für die Lehre zum Ausrichten der 3-PB-Proben, den COD-Clip und das Thermoelement vorhanden sein. Eine kompakte Bauweise sowie die Dämmung aus Styrodur® an der Innenseite der Kühlkammer verringerten den Raum, in dem das Kühlmedium eingeleitet wird, zusätzlich. Das dadurch entstandene Einsparpotential an Stickstoff machte sich als positiver Nebeneffekt bemerkbar. Über eine Düse aus Kupferrohr (siehe Abbildung 17) wurde der gasförmige Stickstoff in die Kammer eingeblasen. Ein 1/2-Zoll-

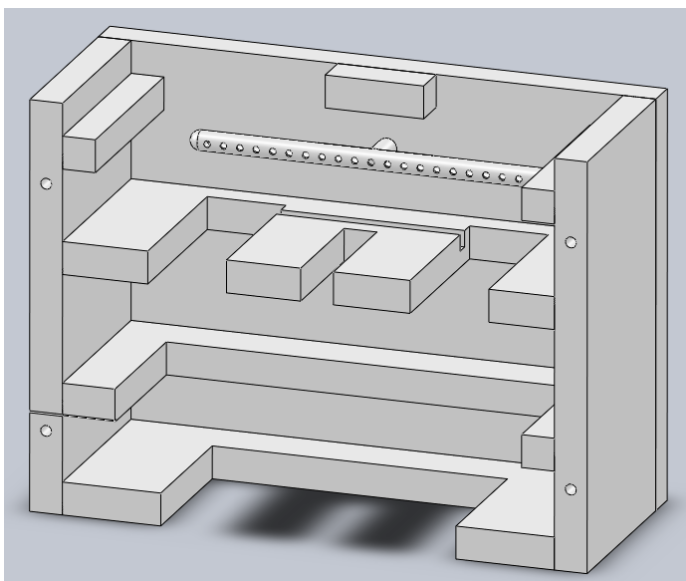


Abbildung 17: Tieftemperaturkammer

Außengewinde Messingfitting diente als Anschluss für den Schlauch. Für das Gehäuse der Kühlkammer wurde Pertinax® verwendet. Nach dem Aufbau der 3-PB-Vorrichtung konnte die Kammer verschlossen und mittels M4X20 Rändelschrauben fixiert werden.

4 Dynamische Risserzeugung

Zur Durchführung der statischen Versuche unter Anwendung des Teilentlastungsverfahrens ist es notwendig, die 3-PB-Proben vorzubereiten. Eine Vorschädigung der Probe muss in Form eines Ermüdungsanrisses vorliegen. Daher sollen in diesem Kapitel die Vorgehensweise, die dazu benötigten theoretischen Grundlagen und Berechnungen sowie die Versuchsdurchführung und -auswertung erläutert werden.

4.1 Aufbau der Resonanzprüfmaschine

Bei dem Resonanzprüfstand der Fa. Sinco Tec GmbH handelt es sich um einen Dreimassenschwinger, der elektromagnetisch betrieben wird. Ein Elektromagnet wird von einem Leistungsverstärker gespeist und bringt somit den Schwingkopf in Erregung. Der Schwingkopf stützt sich über spezielle Federn am oberen Querhaupt der Maschine ab. Durch die vertikale Bauweise ist ein geringer Platzbedarf nötig. Im unteren Teil der Maschine befindet sich der Mittellastantrieb. Über einen Getriebemotor wird die statische Vorlast zwischen Maschinentisch und Schwingkopf über das zu prüfende Bauteil aufgebracht. Zwischen dem Maschinentisch und der Probe befindet sich eine Kraftmessdose zur Ermittlung der anliegenden Kräfte. Das eingespannte Bauteil und die Vorspannfedern wirken als gesamte Federeinheit. Die gesamte Resonanzprüfmaschine wird über Bodenfedern von der Grundplatte entkoppelt, um Schwingungen auf das Gebäude weitestgehend zu unterbinden [Sinco Tec GmbH].

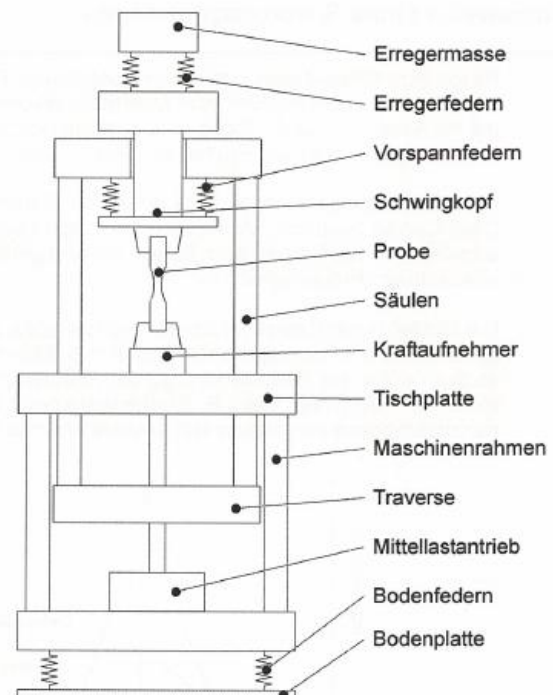


Abbildung 18: Aufbau der Resonanzprüfmaschine
[Sinco Tec GmbH]

4.2 Probenform

Die hier verwendeten 3-PB-Proben zeichnen sich im Vergleich zu den Compact Tension-Proben (CT-Proben) bei gleicher Probenbreite B (siehe Abbildung 19 und Tabelle 3) durch ein geringes Materialvolumen aus. Dadurch werden geringe Prüfkraften benötigt [Blumenauer & Pusch, 1993, S. 86 ff].

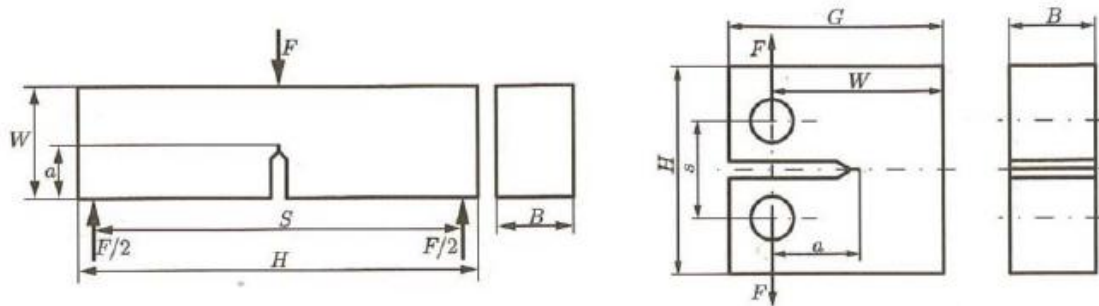


Abbildung 19: Maße der 3-PB-Probe und CT-Probe

[RWTH-Aachen, 2010, S. 96]

Tabelle 3: Probenabmessung der 3-PB-Probe und CT-Probe

3-PB-Probe		CT-Probe	
W	$2B$	W	$2B$
a	$(0,45...0,55)W$	a	$(0,45...0,55)W$
H	Mind. $4,2W$	H	$1,2W$
$K_I = \frac{F * S}{B * W^2} * f_1\left(\frac{a}{W}\right)$		$K_I = \frac{F}{B * W^2} * f_2\left(\frac{a}{W}\right)$	

[Blumenauer & Pusch, 1993, S. 88]

Weiterhin ist bei der Probenform eine Mindestprobendicke erforderlich, da für die Versuche der EDZ erreicht werden muss (siehe Abbildung 3, Kap. 2.1.3). Das ist erforderlich, um sicherzustellen, dass der geometrieunabhängige Werkstoffkennwert K_{IC} ermittelt werden kann. Die Mindestabmessung der Proben kann mit Gl. 4.1 berechnet werden:

$$a, W - a, B \geq \left(\frac{K_{IC}}{R_{p0,2}}\right)^2 \quad (4.1)$$

Vereinfacht können die Mindestabmessungen der Proben über das Verhältnis von der Streckgrenze R_e bzw. der 0,2 %-Dehngrenze $R_{p0,2}$ zum Elastizitätsmodul E berechnet werden, wenn K_{IC} nicht bekannt ist [Blumenauer & Pusch, 1993, S. 89].

4.3 Bezeichnung der 3-Punkt-Biegeproben

Aufgrund des Probenumfangs war es von Anfang an wichtig, ein System zur eindeutigen Bezeichnung der Proben zu wählen. Nach den Wärmebehandlungschargen ergaben sich für GJS-800-8 die Chargen 1, 2 und 3, für GJS-1000-5 die Chargen 4, 5 und 6 und für GJS-1200-3 die Chargen 7, 8 und 9 (siehe Tabelle 2, Kap. 2.2.1). Zusätzlich sind die Proben mit einem S (Sandguss) und einem K (Kokillenguss) entsprechend dem Gießverfahren markiert worden. Nachstehende Beispiele erläutern das Bezeichnungssystem.

Beispiel 1:

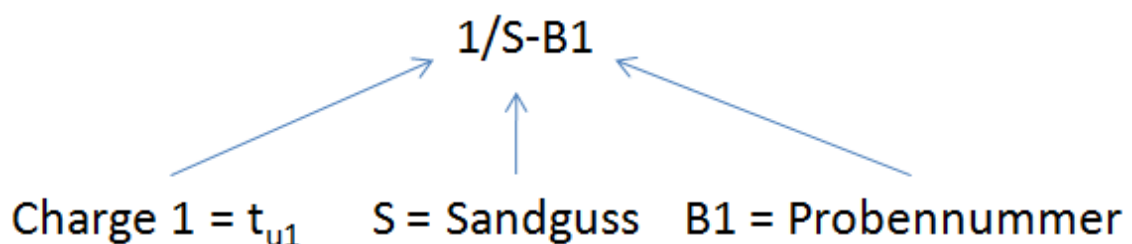


Abbildung 20: Probenbezeichnung

Beispiel 2:

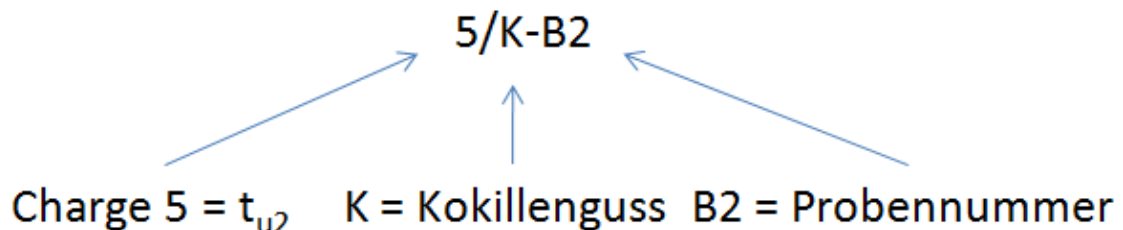


Abbildung 21: Probenbezeichnung

4.4 Theoretische Grundlagen der Anrisserzeugung

Die Entstehung eines Bruches ist meistens die Folge einer von außen einwirkenden Bauteilschädigung, die unterschiedlichste Ursachen haben kann. Materialschäden können sowohl durch Umwelteinflüsse als auch durch eine Unterdimensionierung des Bauteils hervorgerufen werden. Dieser Prozess kann sich über mehrere Jahre hinziehen. In manchen Fällen treten aber auch bereits nach wenigen Tagen oder Wochen bzw. bei zyklischer Belastung nach wenigen Lastwechseln Schäden auf [Schindler, S. 1-1]. Die Entstehung eines Risses läuft weitestgehend gleich ab. Ausgehend von einer globalen Schädigung kommt es zu einer Lokalisierung des geschädigten Bereiches, an dem die Rissbildung stattfindet. Die zweite Phase ist die Rissausbreitung. Diese wird in eine unterkritische und überkritische Rissausbreitung eingeteilt. Während beim unterkritischen Risswachstum der Riss durch nicht mechanische Prozesse (Korrosion, Kriechen) geschädigt wird, kommt es bei der überkritischen Rissausbreitung als Folge des abnehmenden Restquerschnittes zur mechanischen Schädigung des Bauteils. Die mechanische Schädigung führt bis zum vollständigen Versagen des Bauteils [Schindler, S. 1-1].

4.4.1 Berechnung des Geometriefaktors

Da für die zyklische Anrisserzeugung keinerlei Erfahrungswerte in Bezug auf die an der Resonanzprüfmaschine einzustellenden Kräfte für den zu untersuchenden Werkstoff ADI vorlagen, wurde entschieden, die Kräfte über den Spannungsintensitätsfaktor K_I (siehe 4.4.3) zu ermitteln. Für die Berechnung des Geometriefaktors der 3-PB-Probe kann die Gl. 4.2 angewendet werden.

$$f_1 \left(\frac{a}{W} \right) = \frac{3 \left(\frac{a}{W} \right)^{0,5} \left[1,99 - \left(\frac{a}{W} \right) * \left(1 - \frac{a}{W} \right) * \left(2,15 - \frac{3,93a}{W} + \frac{2,7a^2}{W^2} \right) \right]}{2 * \left(1 + \frac{2a}{W} \right) * \left(1 - \frac{a}{W} \right)^{1,5}} \quad (4.2)$$

"Weil die Dehnungsbehinderung bei einem mittleren Risslängenverhältnis a/W am größten ist, wurde in den Prüfvorschriften $0,45 \leq a/W \leq 0,55$ festgelegt" [Blumenauer & Pusch, 1993, S. 89].

Somit kann Gl. 4.2 mit $a = 8 \text{ mm}$ und $W = 20 \text{ mm}$ berechnet werden:

$$f_1\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{8}{20}\right)^{0,5} \left[1,99 - \left(\frac{8}{20}\right)\left(1 - \frac{8}{20}\right)\left(2,15 - \frac{3,93 * 8}{20} + \frac{2,7 * 8^2}{20^2}\right)\right]}{2\left(1 + \frac{2 * 8}{20}\right)\left(1 - \frac{8}{20}\right)^{1,5}} = 1,98$$

Zur Vereinfachung der umständlichen Gl. 4.2 sind bereits Tabellen entwickelt worden (siehe Anhang A).

4.4.2 Berechnung des Spannungsintensitätsfaktors

Für die Ermittlung der Kräfte (siehe 4.4.3) ist weiterhin der Spannungsintensitätsfaktor notwendig. Da dieser noch nicht bekannt ist, kann eine erste Abschätzung über eine Verhältnisgleichung mit dem bekannten Wert von Stahl erfolgen. Weitere bekannte Größen sind hierbei der Elastizitätsmodul E von Stahl und der E -Modul von den drei Festigkeitsklassen des ADI-Gusseisens.

- Berechnung der Spannungsintensitätsfaktoren

geg: $E_{\text{Stahl}} = 210000 \text{ MPa}$

ges: K_I für GJS-800-8

$K_{I \text{ Stahl}} = 18 \text{ MPa}\sqrt{m}$

K_I für GJS-1000-5

$E_{\text{GJS-800-8}} = 170000 \text{ MPa}$

K_I für GJS-1200-3

$E_{\text{GJS-1000-5}} = 168000 \text{ MPa}$

$E_{\text{GJS-1200-3}} = 167000 \text{ MPa}$

GJS-800-8:

$$K_I = \frac{K_{I \text{ Stahl}} * E_{\text{GJS-800-8}}}{E_{\text{Stahl}}} = \frac{18 \text{ MPa}\sqrt{m} * 170000 \text{ MPa}}{210000 \text{ MPa}} \approx 14,6 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

GJS-1000-5:

$$K_I = \frac{K_{I \text{ Stahl}} * E_{\text{GJS-1000-5}}}{E_{\text{Stahl}}} = \frac{18 \text{ MPa}\sqrt{m} * 168000 \text{ MPa}}{210000 \text{ MPa}} \approx 14,4 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

GJS-1200-3:

$$K_I = \frac{K_{I \text{ Stahl}} * E_{GJS-1200-3}}{E_{\text{Stahl}}} = \frac{18 \text{ MPa}\sqrt{m} * 167000 \text{ MPa}}{210000 \text{ MPa}} \approx 14,3 \text{ MPa}\sqrt{m}$$

4.4.3 Ermittlung der Kräfte

Für die zyklische Anrisserzeugung ist die Ermittlung der Eingangsgrößen (Lastamplitude und Mittellast) an der Resonanzprüfmaschine notwendig. Nachdem im Kapitel 4.4.1 und 4.4.2 der Geometriefaktor und der Spannungsintensitätsfaktor berechnet wurden, können nach Gl. 4.3 die an der Resonanzprüfmaschine einzustellenden Kräfte berechnet werden. Der Rollenabstand S , die Probenbreite B und die maximale Kraft F sind als neue Parameter zu nennen.

$$K_I = \frac{\Delta F * S}{B * W^{3/2}} * f_1\left(\frac{a}{W}\right) \quad (4.3)$$

Durch Umstellen nach ΔF erhält man Gleichung 4.4:

$$\Delta F = \frac{K_I * B * W^{3/2}}{S * f_1\left(\frac{a}{W}\right)} \quad (4.4)$$

Mit den Werten aus Tabelle 4 können die Kräfte für die drei Festigkeitsklassen berechnet werden.

Tabelle 4: Parameter zur Kräfteberechnung

a [m]	0,0008
B [m]	0,01
S [m]	0,08
W [m]	0,02
$f\left(\frac{a}{W}\right)$	1,98

Nachfolgend soll die Kräfteberechnung am Beispiel des GJS-800-8 verdeutlicht werden.

$$\Delta F = \frac{K * B * W^{3/2}}{S * f\left(\frac{a}{W}\right)} = \frac{14,6 * 10^6 \text{ N/m}^2 \sqrt{m} * 0,01 \text{ m} * 0,02 \text{ m}^{3/2}}{0,08 \text{ m} * 1,98} \approx 2607 \text{ N}$$

Aus Tabelle 5 sind die maximalen Kräfte (Schwingbreite ΔF) sowie die Kraftamplituden F_a zu entnehmen.

Tabelle 5: Ergebnistabelle der Maximal- und Amplitudenkräfte

	GJS-800-8	GJS-1000-5	GJS-1200-3
$\Delta F = F_{max} \text{ [N]}$	2607	2571	2553
$\Delta F/2 = F_a \text{ [N]}$	1304	1286	1277

Für die Berechnung der Mittellast F_m wird die Oberlast F_o und die Unterlast F_u benötigt. Dabei ist zu beachten, dass die Unterlast über das Verhältnis R von Unterlast zu Oberlast bestimmt wird. Für R wurde der Wert 0,10 festgelegt [Blumenauer & Pusch, 1993, S. 91]. Zur Ermittlung von F_m ist folgende Berechnung notwendig:

$$\Delta F = F_o - F_u \quad (4.5)$$

$$R = \frac{F_u}{F_o} \Rightarrow F_u = R * F_o \quad (4.6)$$

$$\Delta F = F_o - (R * F_o) \Rightarrow \Delta F = (1 - R) * F_o \Rightarrow F_o = \frac{\Delta F}{1 - R} \quad (4.7)$$

$$F_u = F_o - \Delta F \quad (4.8)$$

$$F_m = \frac{F_o + F_u}{2} \quad (4.9)$$

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse der Ober- und Unterlast sowie der Mittellast für die drei Festigkeitsklassen des ADI-Gusses zusammengefasst. Die Mittellast muss negativ sein, da die 3-PB-Proben unter Druck zyklisch beansprucht werden.

Tabelle 6: Ergebnistabelle Ober-, Unter-, Mittellastberechnung

	GJS-800-8	GJS-1000-5	GJS-1200-3
F_o [N]	2897	2857	2837
F_u [N]	290	286	284
F_m [N]	-1593	-1571	-1560

4.5 Versuchsdurchführung

- Prinzip der Anrisserzeugung

Bei der zyklischen Anrisserzeugung wird die Tatsache ausgenutzt, dass jeder Körper eine Steifigkeit besitzt. Die Arbeitsfrequenz eines Resonanzpulsators ist von der Probensteifigkeit abhängig. Wird ein Körper infolge einer zyklischen Belastung geschädigt, bewirkt dies eine Änderung der Steifigkeit. Demzufolge ist eine Frequenzänderung ein Maß für eine Änderung der Risslänge.

- Einrichten der Resonanzprüfmaschine

Nachdem die Proben auf der 3-PB-Vorrichtung aufgelegt (siehe Kapitel 3.2) und in der Prüfmaschine eingespannt (Vorlast ca. 100 N) worden sind, sollten in der dazugehörigen Prüfsoftware "EMOTION II" die Versuchsreihen angelegt werden. Zur eindeutigen Zuordnung wurden die Versuchsreihen gemäß den Chargen 1...9 mit den jeweiligen Probennummern sowie den Versuchsnummern angelegt, wobei die Versuchsnummer die einzelnen Laststufen darstellen (Tabelle 7).

Tabelle 7: Angabe der Proben im Programm "EMOTION II"

Charge	Probennummer	Versuchsnummer = Laststufe
1S	B1	Laststufe 1
		Laststufe 2
		Laststufe 3
1S	B 2	Laststufe 1
		Laststufe 2
		Laststufe 3

Weiterhin sind die im Kapitel 4.4.3 berechneten Kräfte und die Abbruchkriterien vor Versuchsstart anzugeben. Da Erfahrungswerte in Bezug auf die Frequenzänderung als Abbruchkriterium fehlten, mussten diese Werte durch Versuche ermittelt werden. Es stellte sich heraus, dass die erforderliche Risslänge $a = 10$ mm bei einer Frequenzdifferenz Δf von ca. 5,5 bis 6,5 Hz bei zwei bis drei Laststufen in Abhängigkeit der jeweiligen Festigkeit und der Wärmebehandlung des ADI-Gusses erreicht wurde. "Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, nach dem Beginn des Risswachstums die Oberlast und Mittellast schrittweise zu verringern, um die Ausbildung der plastischen Zone an der Rissspitze des Ermüdungsanrisses so klein wie möglich zu halten" [Blumenauer & Pusch, 1993, S. 91]. In Tabelle 8 sind nach den in Kapitel 4.4.3 errechneten Kräfte für die erste maximale Laststufe die Kräfte für die Laststufen 2 und 3 berechnet worden, wobei 15 % Lastabsenkung pro Laststufe zugrunde gelegt worden ist.

Tabelle 8: Übersicht Laststufen und Frequenzdifferenz

Laststufe	GJS-800-8		GJS-1000-5		GJS-1200-3		Δf
	F_a [N]	F_m [N]	F_a [N]	F_m [N]	F_a [N]	F_m [N]	
1	1304	-1593	1286	-1571	1277	-1560	2,5
2	1108	-1354	1093	-1335	1085	-1326	2,5
3	942	-1151	929	-1135	923	-1127	2

- Vergleich der theoretischen mit den tatsächlichen Ergebnissen

Bei der Durchführung der Versuche stellte sich heraus, dass die in Tabelle 8 berechneten Werte für eine Anrisserzeugung zu niedrig sind. Die Versuche wurden bei 200.000 Lastspielen abgebrochen, da sich keine Frequenzänderung einstellte. Aufgrund fehlender Erfahrungen wurde die Last schrittweise um 5 % erhöht, bis die Rissbildung einsetzte. Die neuen Werte sind in Tabelle 9 zusammengefasst. Es stellte sich heraus, dass die Lastamplituden für alle drei Festigkeitsklassen und bei allen Laststufen um ca. 300 N erhöht werden mussten. Bei der Mittellast musste für die Laststufe 1 um ca. 500 N, für die Laststufe 2 um ca. 400 N und für Laststufe 3 um ca. 300 N erhöht werden. Diese Werte galten dabei wieder für alle drei Festigkeitsklassen.

Tabelle 9: Praktische Versuchsergebnisse der Anrisserzeugung

Laststufe	GJS-800-8		GJS-1000-5		GJS-1200-3	
	F_a [N]	F_m [N]	F_a [N]	F_m [N]	F_a [N]	F_m [N]
1	1600	-1956	1600	-1956	1600	-1956
	1600	-2150	1600	-2150	1600	-2150
2	1440	-1760	1440	-1760	1440	-1760
	1296	-1584	1296	-1584	1296	-1584
3	1167	-1426	1167	-1426	1167	-1426

4.6 Vermessung der Risslänge

Nachdem die 3-PB-Proben durch zyklische Beanspruchung den Anriss erhalten hatten, wurde zur Kontrolle die Anrisslänge überprüft. Um den Rissverlauf unter dem Stereomikroskop erkennen zu können, sind die Proben seitlich im Bereich des Risses mit Schleifpapier der Körnung P 800 angeschliffen worden. Die Schleifrichtung muss dabei 90° zur Ausbreitungsrichtung des Risses liegen. Stichprobenartige Vermessungen belegten die korrekte Durchführung der Ermüdungsversuche zur Anrisserzeugung, da alle Proben gemäß der Forderung $0,45 \leq a/W \leq 0,55$ eine Anrisslänge a von 9 mm bis 11 mm vorweisen konnten.

5 Statische Versuche

Nach der zyklischen Anrisserzeugung sind die statischen 3-PB-Versuche unter Anwendung der Einprobentechnik bzw. des Teilentlastungsverfahrens durchzuführen. Die Versuche finden bei RT und -40°C statt. Daher soll in diesem Kapitel neben den theoretischen Grundlagen der Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung und -auswertung erläutert werden.

5.1 Theoretische Grundlagen

Bei der Messung der stabilen Rissverlängerung Δa wird zwischen der Ein- und Mehrprobentechnik unterschieden. In der Praxis findet vorwiegend das Teilentlastungsverfahren als Einprobentechnik Anwendung. "Das Prinzip des Teilentlastungsverfahrens beruht auf der Zunahme der elastischen Nachgiebigkeit (Compliance) C einer angerissenen Probe mit wachsender Risslänge" [Blumenauer & Pusch, 1993, S. 117]. Die Probe wird in bestimmten Abständen der Aufweitung teilweise entlastet und wieder belastet. Die Entlastungen führen zu linearen Anstiegen in den Kraft-Kerbaufweitungskurven (F - V -Kurven, siehe Abbildung 22).

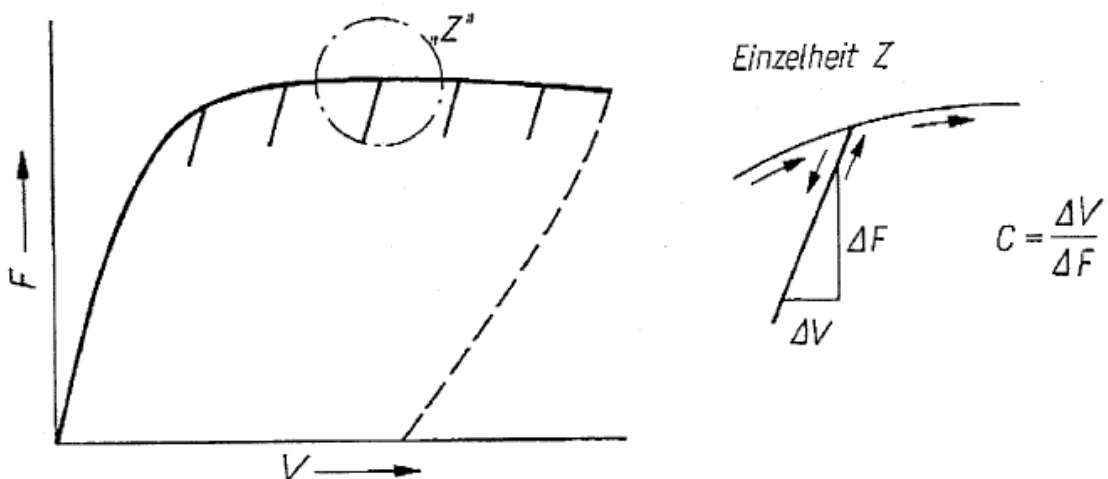


Abbildung 22: Kraft-Kerbaufweitungskurve, schematisch dargestellt

[Blumenauer & Pusch, 1993, S. 117]

Mit der Gleichung

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta F} \quad (5.1)$$

wird die Nachgiebigkeit während des Versuches an jedem Be- und Entlastungspunkt bestimmt [Blumenauer & Pusch, 1993, S. 117 f]. Der Zusammenhang zwischen J bzw. δ und dem stabilen Rissfortschritt Δa stellt in der Fließbruchmechanik die R-Kurve dar und charakterisiert die J-kontrollierte Rissausbreitung für den duktilen Versagensbereich. "Mit den J - Δa bzw. δ - Δa -Kurven werden die aufeinanderfolgenden Stadien der Rissabstumpfung (Blunting), -initiierung und des stabilen Rissfortschrittes erfasst" [Blumenauer & Pusch, 1993, S. 71]. Der typische Verlauf einer R-Kurve ist in Abbildung 23 am Beispiel der Probe 3/K-B6 zu sehen.

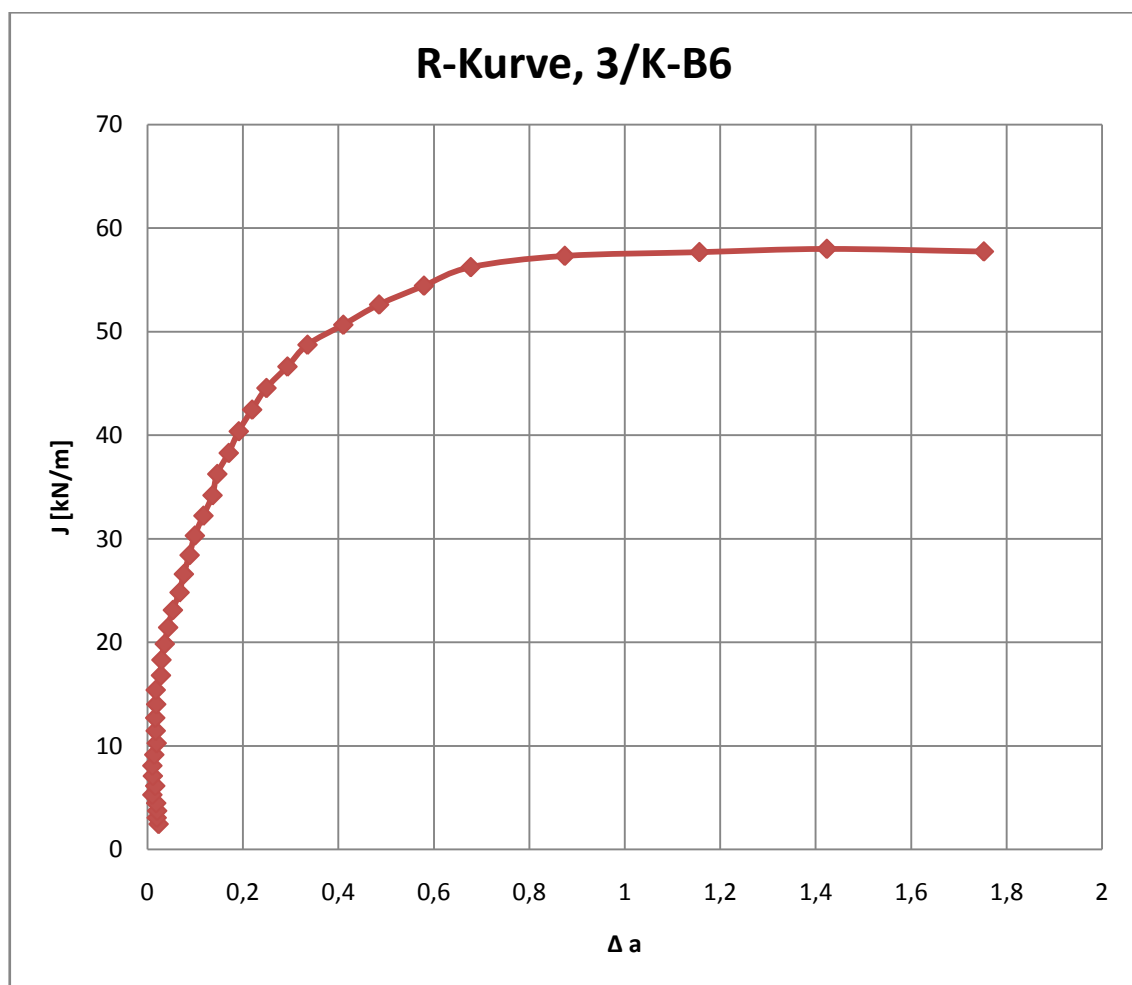


Abbildung 23: Risswiderstandskurve

5.2 Versuchsvorbereitung

Bevor die 3-PB-Proben nach dem Teilentlastungsverfahren geprüft werden können, ist es sinnvoll Seitenkerben einzubringen, um einen gleichmäßigen mehrachsigen Spannungszustand zu erreichen (siehe Anhang E). Ziel ist, eine gerade Rissfront und eine lokale Verformungsbehinderung im Bereich der Risspitze zu erhalten [Blumenauer & Pusch, 1993, S. 109 f]. Für die Versuche im Tieftemperaturbereich ist es auch von Vorteil, durch funkenerosives Abtragen Kerben zum Anbringen des COD-Clips einzubringen, da hier eine Klebverbindung zwischen Messschneiden und der 3-PB-Probe nicht beständig ist. Genaue Maße sind als Technische Zeichnung im Anhang F beigelegt.

5.3 Versuchsdurchführung

Für die Versuchsdurchführung zur Aufnahme der J - Δa - bzw. δ - Δa -Wertepaare und der F - V -Kurve ist die 3-PB-Vorrichtung, wie in Kapitel 3 beschrieben, an der UPM Shimadzu AGG 100 kN zu montieren und mit Hilfe der Lehre zur Ausrichtung der Prüfvorrichtung mit einer Kraft von 10 kN zu belasten, um Setzvorgänge der Vorrichtung im Versuchsbetrieb zu vermeiden. Nach dem Öffnen der Prüfsoftware "LabMaster" und dem Einschalten der UPM ist eine Verbindung



zwischen beiden Komponenten zur Steuerung der UPM notwendig. Mit der Aktivierung des Buttons "Verbinden" im Programm "LabMaster" ist die UPM nun einsatzbereit. Ein Einlegen der 3-PB-Probe kann nun unter Verwendung der im Kapitel 3 beschriebenen Lehren erfolgen. Nachdem die Messschneiden an der 3-PB-Probe befestigt und der COD-Clip angebracht worden ist, sind die 3-PB-Proben in die Vorrichtung einzulegen.

Abbildung 24: Einlegen der 3-PB-Probe an der UPM

Wenn die 3-PB-Probe ausgerichtet ist, sollte diese mit einer Vorlast von 300 N fixiert werden (siehe Abbildung 24). Für Versuche bei -40°C ist die Vorlast auf 700 N anzuheben, da bei der Abkühlung eine Schrumpfung des Probenmaterials einen Vorkraftverlust zur Folge hat. Gegebenenfalls ist eine Nachjustierung der Kraft während des Abkühlens der 3-PB-Proben notwendig. Im nächsten Schritt muss der COD-Clip im Programm "LabMaster" tariert werden. Nun kann mit dem Einrichten der Messreihen begonnen werden. Neben den werkstoffphysikalischen Eigenschaften und der Probengeometrie sind die Abbruchkriterien festzulegen. Im Anhang G sind die verwendeten Werte zusammengefasst. Zur zusätzlichen Sicherheit sollten die mechanischen Endlagenschalter der UPM so eingestellt sein, dass bei plötzlichem Bruch der 3-PB-Probe eine Kollision mit dem COD-Clip vermieden wird. Nun ist der Versuchsaufbau für den Programmablauf des Teilentlastungsverfahrens bereit.

- **Programmablauf**

Nach Betätigen des Buttons "Test starten" wird vom Programm die Anfangsrisslänge (a_0 -check) ermittelt. Dabei fährt die UPM dreimal infolge kraftgesteuert von der Vorlast (300 N) bis auf 1 kN und entlastet wieder. Jeder Zyklus muss mit dem Button "Weiter" bestätigt werden. Nach erfolgreichem Messen der Anfangsrisslänge wechselt das Programm zum J-R-Test. Das Programm beginnt in Schleifenform die einzelnen Teilentlastungen zu fahren. Ausgehend von der Vorkraft von 300 N soll die erste Schleife genauer beschrieben werden, wobei die UPM kraft- und weggesteuert arbeitet. Im ersten Schritt stellt die UPM 15 μm mit 0,4 mm/min weggesteuert zu. Nach der Datenerfassung wird 20 s auf dem Lastniveau gehalten, damit Relaxationsvorgänge stattfinden können. Im zweiten Schritt entlastet die UPM um 20 % von der im ersten Schritt aufgenommen Kraft. Die UPM entlastet kraftgesteuert mit 100 N/s die 3-PB-Probe. Nach Berechnung der Resultate beginnt die nächste Schleife. Der Versuch wird bis zum Erreichen der vorgegebenen Abbruchkriterien fortgeführt.

- **Tieftemperaturversuche**

Der Versuchsablauf für die Versuche bei -40°C ist dem bei RT gleich. Jedoch sind für den Versuchsaufbau weitere Komponenten zur Kühlung der 3-PB-

Vorrichtung und -Probe erforderlich. Ausgehend von einem mit flüssigen Stickstoff gefüllten Behälter wird über einen Kugelhahn Stickstoff über einen Teflon-(PTFE) Wellschlauch in die Kühlkammer (Abbildung 25) zugeführt. Durch eine Kupferrohrdüse wird der bereits gasförmige Stickstoff gleichmäßig entlang der 3-PB-Probe verteilt. Für die Regulierung des Volumenstromes wurde ein Proportionalventil mit Ansteuerkarte (siehe Anhang C und D) der Fa. ASCO zwischengeschaltet. Zur Messung der Temperatur wurde an der 3-PB-Probe im Bereich des Ligaments ein Thermoelement vom Typ K (Ni-Cr/Ni) mit TESA®-Film befestigt (Abbildung 25). Die zentrale Steuerung zum Einstellen der Temperatur wurde von einem Eurotherm-Regler übernommen, der sowohl mit dem Thermoelement als auch mit dem Proportionalventil zur Steuerung des Volumenstromes gekoppelt ist und somit nach gemessener Temperatur die Stickstoffzufuhr kontrolliert. Nachdem die 3-PB-Probe eingerichtet und die Kühlkammer geschlossen ist, kann mit der Kühlung begonnen werden. Folgende Schritte sind durchzuführen. Am Eurotherm-Regler ist der Sollwert mit den "Pfeil oben"- und "Pfeil unten"-Tasten einzugeben und mit "Run" zu starten. Dann wird der Kugelhahn 45° geöffnet. Bevor der Versuch gestartet werden kann, ist eine Durchkühlungsdauer der ADI-Proben einzuhalten. Diese beträgt ca. 15 min. Während der Durchkühlung ist auf die Vorlast zu achten. Wenn die Durchkühlung erfolgt ist, kann der Versuch, wie bei RT beschrieben, fortgesetzt werden. Nach dem Beenden des Versuches ist der Kugelhahn zu schließen und das Programm des Eurotherm-Reglers mit der Taste "Stop" zu beenden.

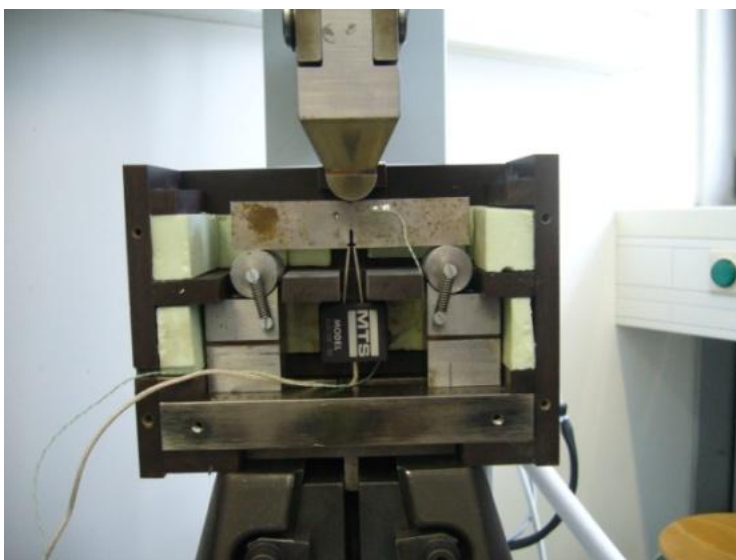


Abbildung 25: Kühlkammer mit Thermoelement und COD-Clip

5.4 Versuchsauswertung

- Risslängenvermessung

Im Anschluss an das Teilentlastungsverfahren sind die 3-PB-Proben mit einem weiteren Ermüdungsanriss bei einer höheren Lastamplitude zu versehen. Das Ziel dabei ist, die statische Rissausbreitung von der Restbruchfläche unterscheiden zu können. Eine andere Methode ist ein ca. 15-minütiges Anlassen bei ca. 350°C, welches hier bei den Tieftemperaturproben zur Anwendung kommt, da die oxidierten Rissflächen sich deutlich von der Restbruchfläche abheben. In der Praxis hat sich dieses Verfahren bewährt, da es zum einen wesentlich schneller ist und zum anderen die Bruchflächen eindeutig voneinander unterschieden werden können. Danach wird an der UPM der Bruch der 3-PB-Proben eingeleitet, um die Bruchflächen vermessen zu können. Nach ISO/FDIS 12135: 2002(E) ist die Anfangsrisslänge a und die stabile Rissvergrößerung Δa an neun Messstellen zu vermessen. Die Mittelwertberechnung erfolgt mit der Gleichung:

$$a = \frac{1}{8} * \left[\frac{a_1 + a_9}{2} + \sum_{i=2}^8 a_i \right] \quad (5.2)$$

bzw.

$$\Delta a = \frac{1}{8} * \left[\frac{a_1 + a_9}{2} + \sum_{i=2}^8 a_i \right] \quad (5.3)$$

Die Vermessung der Bruchflächen erfolgte mit der Bildbearbeitungssoftware ANALYSIS. Die gemessenen Werte konnten so in Excel exportiert werden. Für die Vermessung wurde eine einheitliche Vorgehensweise notwendig, um die Messwerte zuordnen zu können. Der Ermüdungsanriss wurde mit den Messpunkten 1 bis 9 von links nach rechts und die stabile Rissvergrößerung mit den Messpunkten 10 bis 18 von links nach rechts gekennzeichnet (siehe Anhang H). Am Beispiel der Probe 3/K-B7 (Anhang H) ergab die Messung $a_0 = 2,45$ mm und $\Delta a = 2,06$ mm.

- J-Integral bestimmen

Die Bestimmung des J-Integrals kann mittels Prüfsoftware "LabMaster" erfolgen, da diese Software den J-Wert während der Versuche automatisch berechnet. Gegebenenfalls ist das J-Integral nach Gleichung 5.4 zu berechnen [ISO/FDIS 12135: 2002(E)].

$$J = \left[\left(\frac{S}{W} \right) \frac{F}{(BB_N W)^{0,5}} f_1 \left(\frac{a_0}{W} \right) \right]^2 \left[\frac{(1-\nu^2)}{E} \right] + \left[\frac{2U_p}{B_N (W-a_0)} \right] \left[1 - \left(\frac{\Delta a}{2(W-a_0)} \right) \right] \quad (5.4)$$

- Berechnung des CTOD Wertes bzw. δ -Wertes

Nachfolgend soll eine Berechnung nach der in der ISO/FDIS 12135: 2002(E) angegebenen Gleichung 5.5 der CTOD-Wert δ ermittelt werden.

$$\delta = \delta_e + \delta_p = \frac{K_I^2}{m R_{p0,2} E'} + \frac{0,4(W-a_0)}{a+0,4(W-a)+z} V_p \quad (5.5)$$

mit

$$E' = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (5.6)$$

$$V_p = V_{ges} - V_e \quad (5.7)$$

$$V_e = V_{m1} \left[1 + \left(\frac{z}{0,8a+0,2W} \right) \right] \quad \text{für } \frac{z}{a} \leq 0,2 \quad (5.8)$$

$$C = \frac{V_{m1}}{F} = \frac{S(1-\nu^2)}{EB_e W} g_3 \left(\frac{a}{W} \right) \quad (5.9)$$

$$V_{m1} = \left[\frac{S(1-\nu^2)}{EB_e W} g_3 \left(\frac{a}{W} \right) \right] F \quad (5.10)$$

$$g_3 \left(\frac{a}{W} \right) = 6 \left(\frac{a}{W} \right) \left[0,76 - 2,28 \left(\frac{a}{W} \right) + 3,87 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 2,04 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + \frac{0,66}{(1-\frac{a}{W})^2} \right] \quad (5.11)$$

$$B_e = B - \frac{(B - B_N)^2}{B} \quad (5.12)$$

[ISO/FDIS 12135: 2002(E)]

- Erstellung der J - Δa - und δ - Δa -Kurve

Die Aufnahmen der J-R-Kurven erfordern die experimentelle Bestimmung der belastungsabhängigen J - Δa - bzw. δ - Δa -Wertepaare. Die aufgenommenen J-R-Kurven sind im Anhang I am Beispiel der 3/S-B6-Probe grafisch dargestellt.

- Berechnung der Rissinitiierungswerte $J_{(iBL)}$ bzw. $\delta_{(iBL)}$

Die Berechnung der Rissinitiierungswerte $J_{(iBL)}$ und $\delta_{(iBL)}$ wird über den Schnittpunkt zwischen Blunting-Line (Gl. 5.13 und 5.14) und der R-Kurve ermittelt.

$$J = 3,75 * R_m * \Delta a \quad (5.13)$$

$$\delta = 1,87 * \frac{R_m}{R_{p0,2}} * \Delta a \quad (5.14)$$

Am Beispiel der 3/S-B6-Probe werden folgende Werte ermittelt:

$$J = 3,75 * R_m * \Delta a = 3,75 * \frac{1059,1 \text{ N}}{\text{mm}^2} * 0,003615 \text{ mm}$$

$$J = 14,36 \text{ N/mm}$$

$$\delta = 1,87 * \frac{R_m}{R_{p0,2}} * \Delta a = 1,87 * \frac{1059,1 \text{ N/mm}^2}{628,9 \text{ N/mm}^2} * 1,35 * 10^{-5} \text{ mm}$$

$$\delta = 0,00004251 \text{ mm}$$

- Gültigkeitskriterium überprüfen

Abschließend ist das Dickenkriterium nach ISO/FDIS 12135: 2002(E) zu überprüfen. Dies bestätigt die Geometrieunabhängigkeit der physikalischen Rissinitiierungswerte.

Es sind folgende Bedingungen zu erfüllen:

$$J_{iBL} \leq \text{Minimum } J_{max} \quad (5.17)$$

$$\delta_{iBL} \leq \text{Minimum } \delta_{max} \quad (5.18)$$

Die Berechnung der maximalen J - und δ -Werte sind mit den Gleichungen 5.19 bis 5.21

$$J_{max\ 1} = a_0 \left[\frac{(R_{p\ 0,2} + R_m)}{40} \right] \quad (5.19)$$

$$J_{max\ 2} = B \left[\frac{(R_{p\ 0,2} + R_m)}{40} \right] \quad (5.20)$$

$$J_{max\ 3} = (W - a_0) \left[\frac{(R_{p\ 0,2} + R_m)}{40} \right] \quad (5.21)$$

beziehungsweise mit den Gleichungen 5.22 bis 5.24

$$\delta_{max\ 1} = \frac{a_0}{30} \quad (5.22)$$

$$\delta_{max\ 2} = \frac{B}{30} \quad (5.23)$$

$$\delta_{max\ 3} = \frac{(W - a_0)}{30} \quad (5.24)$$

zu berechnen [ISO/FDIS 12135: 2002(E)].

Bei der Überprüfung des Gültigkeitskriterium der 3/S-B6-Probe wurden nach den Gleichungen 5.19 bis 5.24 folgende Werte ermittelt und in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10: Werte für Gültigkeitskriterium

$J_{max\,1}$ [N/mm]	462,09
$J_{max\,2}$ [N/mm]	422,00
$J_{max\,3}$ [N/mm]	381,91
$\delta_{max\,1}$ [mm]	0,365
$\delta_{max\,2}$ [mm]	0,333
$\delta_{max\,3}$ [mm]	0,302

Es folgt:

$$J_{iBL} \leq \text{Minimum } J_{max} \Rightarrow 14,36 \text{ N/mm} \leq 381,91 \text{ N/mm}$$

$$\delta_{iBL} \leq \text{Minimum } \delta_{max} \Rightarrow 0,00004251 \text{ mm} \leq 0,302 \text{ mm}$$

Da die Bedingungen nach Gl. 5.17 und 5.18 erfüllt sind, ist die Geometrieunabhängigkeit der physikalischen Rissinitiierungswerte erwiesen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel der Bachelorarbeit war es, eine systematische Vorgehensweise für einen bruchmechanischen Prüfstand zu entwickeln. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse zeigen zum einen die korrekte Durchführung der Versuche und zum anderen sind diese eine Grundlage für weitere bruchmechanische Untersuchungen. So ist es möglich, auch andere Probenformen, wie z.B. CT-Proben zu testen. Die Temperiereinrichtung ist konstruktiv so gestaltet worden, dass diese universell einsetzbar ist. Somit können auch an anderen Probenformen Tieftemperaturversuche, unter der Voraussetzung der entsprechenden Kühlkammer, geprüft werden. Es zeigte sich, dass die 3-PB-Vorrichtung hinsichtlich ihrer Anforderungen alle Kriterien erfüllte. Jedoch sind insbesondere an der Universalprüfmaschine Shimadzu AGG 100 kN im Bereich der Spannbackenhalterung weitere Maßnahmen zur Versteifung der Vorrichtung notwendig. Das ist der Tatsache geschuldet, dass diese UPM hauptsächlich für Zugversuche ausgelegt worden ist. Für die Versuche zur zyklischen Anriss erzeugung konnte nachgewiesen werden, dass es möglich ist, die Risslänge über den Frequenzabfall der 3-PB-Proben zu bestimmen. Da diese Methode zum ersten Mal an der Hochschule Anwendung fand, war dies mit einem höheren Versuchsaufwand verbunden. Daraus resultierend ist eine weitere Verbesserung in Bezug auf die exakte Anrisslänge notwendig. Die Anrisslänge kann z. B. durch Anbringen eines COD-Clips gemessen werden. Dies erspart das aufwendige Anschleifen und Vermessen der Anrisslängen. Softwareseitig kann eine weitere Automatisierung der Versuche durch automatisches Umstellen der Laststufen nach bestimmten Schwingspielen erfolgen und somit Arbeit und Zeit einsparen. Bei den statischen Versuchen sind die Versuche bei Raumtemperatur und Tieftemperatur erfolgreich verlaufen. Aber auch hier können Verbesserungen vorgenommen werden. So kann die Risslänge noch mittels der Elektropotentialmethode vermessen werden und mit der Vermessung der Kerbaufweitung (COD-Clip) verglichen werden. In der verwendeten Materialprüfsoftware "LabMaster" ist die Implementierung des CTOD-Wertes von Vorteil. Es empfiehlt sich, ebenfalls eine Automatisierung für die statischen Versuche vorzunehmen. Mit dem Programm "Steady-Rise" der Fa. Hegewald und Peschke, einer Ansteuersoftware

für den Eurotherm-Regler, können die Durchführung, Überwachung und Dokumentation der Temperierungsvorgänge realisiert werden.

Literaturverzeichnis

- [1]. Bargel, H.-J., & Schulze, G. (2005). *Werkstoffkunde*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- [2]. Bartels, C., & Michelberger, L. (07 2006). Flexibler Leichtbau. *Das IndustrieMagazin*, S. 3.
- [3]. Blumenauer, H., & Pusch, G. (1993). *Technische Bruchmechanik*. Leipzig Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.
- [4]. Gründling, D.-I. J. (06 2003). ADI-Leichtbau mit Gusseisen. *Konstruktion*, S. 6.
- [5]. *ISO/FDIS 12135: 2002(E)*.
- [6]. Klöpfer, C., Schliephake, U., & Bartels, C. *Leichtbaupotentiale durch ADI nutzen*. Bielefeld: CLAAS GUSS GmbH.
- [7]. RWTH-Aachen. (2010). [www.iwm.rwth-aachen.de](http://www.iwm.rwth-aachen.de/upload/pdf/Lehre/WS2010_11/WKI_Teil_I/Skript/Skript_2010-Kapitel_8.pdf), http://www.iwm.rwth-aachen.de/upload/pdf/Lehre/WS2010_11/WKI_Teil_I/Skript/Skript_2010-Kapitel_8.pdf
- [8]. Schindler, D. H. *Mechanische Werkstoffprüfung - klassische Verfahren und neue Entwicklungen*.
- [9]. Sinco Tec GmbH. *Bedienungsanleitung*. Clausthal-Zellerfeld.
- [10]. Weißbach, W. (2007). *Werkstoffkunde*. Wiesbaden: Viewegs Fachbücher der Technik.
- [11]. Wittwer, U., & Rechsteiner, A. (Dez. 2005). *ADI-Werkstoff mit Potential*. Emmenbrücke: vonRollcasting.

Anhangsverzeichnis

- Anhang A: Geometriefaktoren für $0,45 \leq a/W \leq 0,55$
- Anhang B: Technische Zeichnungen 3-PB-Prüfvorrichtung
- Anhang C: Datenblatt ASCO Proportionalventil Posiflow
- Anhang D: Datenblatt ASCO Steckerverstärker
- Anhang E: Bilder Bruchfläche
- Anhang F: SENB-Probe Kerbe COD-Clip
- Anhang G: Versuchsparameter des Teilentlastungsverfahrens
- Anhang H: Raster für Bruchflächen-/ Risslängenvermessung
- Anhang I: J - Δa - und δ - Δa -Kurve

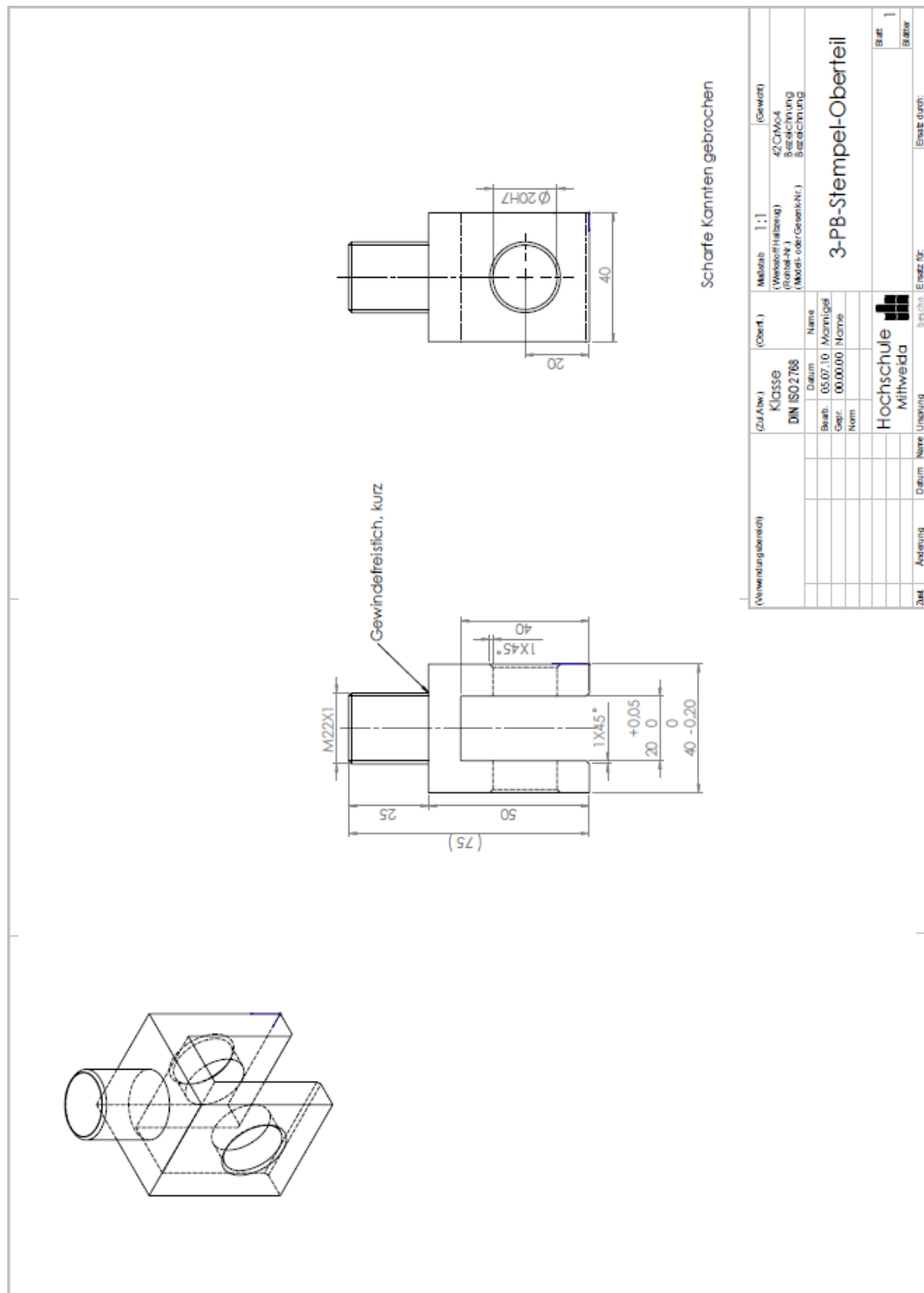
Anhang

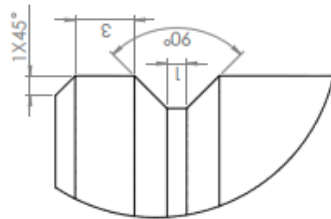
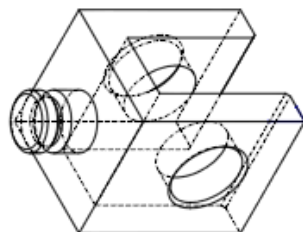
Anhang A: Geometriefaktoren für $0,45 \leq a/W \leq 0,55$

a/W	3-PB-Probe $f_1(a/W)$	CT-Probe $f_2(a/W)$	C-Probe $f_3(a/W)$	RCT-Probe $f_4(a/W)$
0,450	2,29	8,34	3,23	8,71
0,455	2,32	8,46	3,27	8,84
0,460	2,35	8,58	3,32	8,97
0,465	2,39	8,70	3,37	9,11
0,470	2,43	8,83	3,42	9,25
0,475	2,46	8,96	3,47	9,40
0,480	2,50	9,09	3,52	9,55
0,485	2,54	9,23	3,57	9,70
0,490	2,58	9,37	3,62	9,85
0,495	2,62	9,51	3,68	10,01
0,500	2,66	9,66	3,73	10,17
0,505	2,70	9,81	3,79	10,37
0,510	2,75	9,96	3,85	10,51
0,515	2,79	10,12	3,91	10,68
0,520	2,84	10,29	3,97	10,86
0,525	2,89	10,45	4,03	11,05
0,530	2,94	10,63	4,10	11,24
0,535	2,99	10,80	4,17	11,43
0,540	3,04	10,98	4,24	11,63
0,545	3,09	11,17	4,31	11,83
0,550	3,14	11,36	4,38	12,04

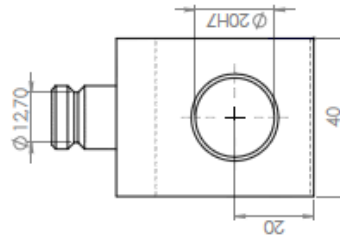
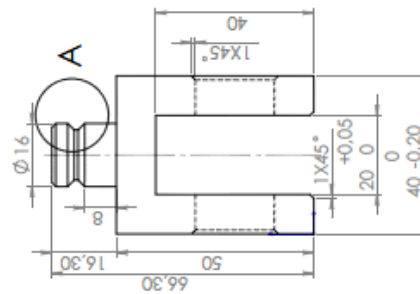
[Blumenauer & Pusch, 1993, S. 98]

Anhang B: Technische Zeichnungen 3-PB-Prüfvorrichtung



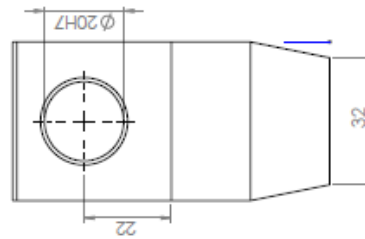
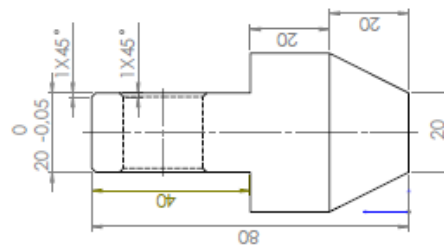
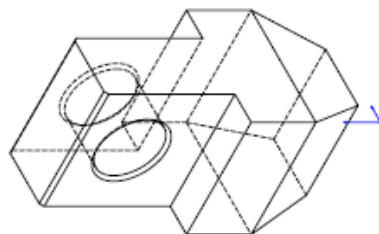


A (5:1)



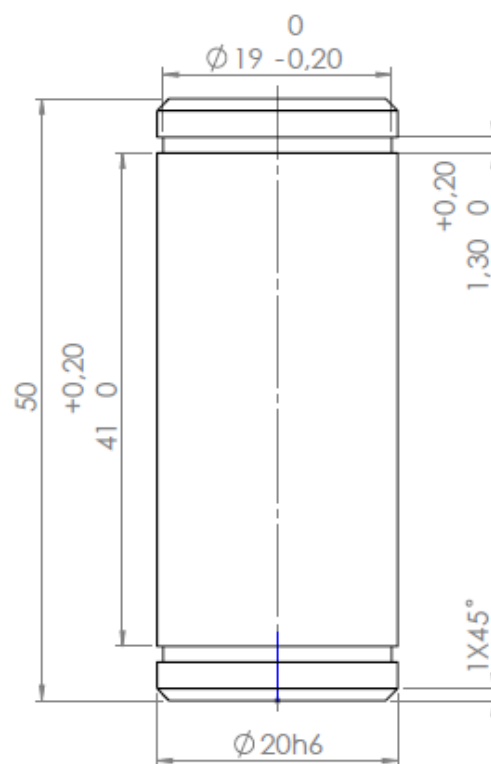
Scharfe Kanten gebrochen

[illegible]

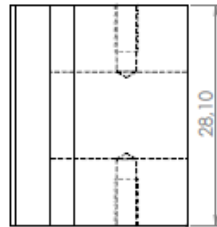
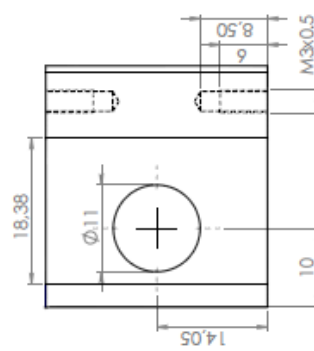
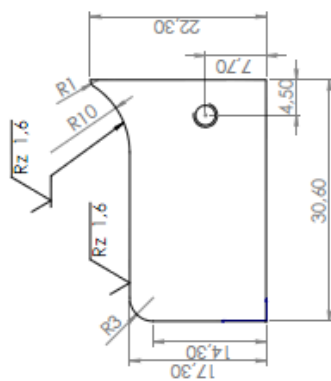
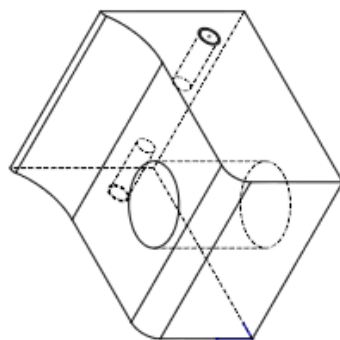


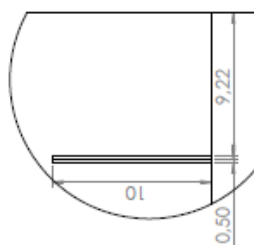
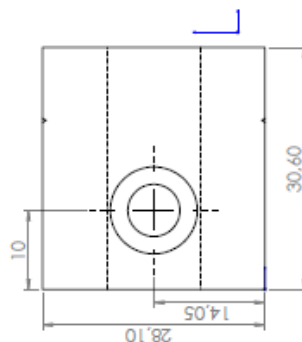
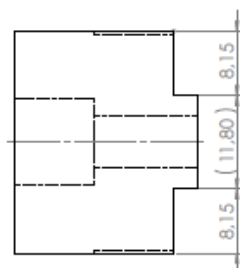
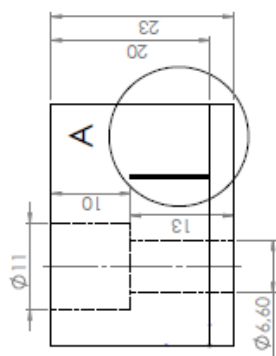
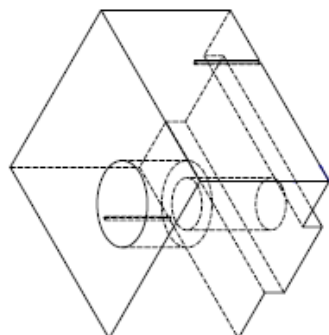
Scharfe Kanten gebrochen

[illegible]



(Verwendungsbereich)			(Zul.Abw.)	(Oberfl.)	Maßstab 2:1	(Gewicht)
			Klasse		(Werkstoff Halbbezug)	100CR6, gehärtet (62 +/- 2)HRC
			DIN ISO 2768		(Rohteil-Nr.)	Bezeichnung
					(Modell- oder Gesenk-Nr.)	Bezeichnung
			Datum	Name	3-PB-Stempel-Bolzen	
			Bearb. 05.07.10	Mannigel		
			Gepr. 00.00.00	Name		
			Norm			
			Hochschule Mittweida			Blatt 3
			beschn.			Blätter
Zust.	Änderung	Datum	Name	Ursprung	Ersatz für:	Ersatz durch:

[illegible]



A (4:1) V-Nut (beidseitig)

Scharfe Kanten gebrochen

[illegible]

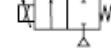
Anhang C: Datenblatt ASCO Proportionalventil Posiflow

ASCO®**PROPORTIONALVENTIL****POSIFLOW**

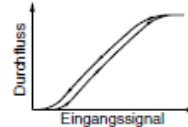
direkt betätigt

1/4 - 3/8

NC

2/2
Baureihe
202**MERKMALE**

- Variabler Durchfluss proportional zum Regelsignal.
- Kein Mindestbetriebsdruck erforderlich.
- Die Ventile können ohne Beeinträchtigung der Funktion in jeder beliebigen Einbaulage montiert werden.
- Das Ventil entspricht den geltenden EU-Richtlinien

**ALLGEMEINES**

Differenzdruck

Max. Viskosität

Siehe "KENNDATEN" [1 bar = 100 kPa]
21 cSt (mm²/s)

Medium (*)	Temperaturbereich (°)	Dichtwerkstoff (*)
Luft, Gas, Wasser, Öl	- 10°C bis 90°C	FPM (Fluorkautschuk)

MEDIUMBERÜHRTE TEILE

(*) Die Beständigkeit der mediumberührten Teile gegenüber den verwendeten Medien ist zu überprüfen.

Gehäuse
Führungsrohr
Magnetanker und Gegenanker
Federn
Gleitring
Ventilsitz
Dichtung, Sitzdichtung
Remanenzscheibe

Messinggehäuse

Messing
Edelstahl
Edelstahl
Edelstahl
PTFE
Messing
FPM
Edelstahl

Edelstahlgehäuse

AISI 303 SS
Edelstahl
Edelstahl
Edelstahl
PTFE
Edelstahl
FPM
Edelstahl

ELEKTRISCHE DATEN

Isolationsklasse (Magnet)

Elektrischer Anschluss

F
Leitungsdose (Kabel-Ø 6-10 mm)
ISO 4400 / EN 175301-803, Bauform A
IEC 335
IP65 (EN 60529)
DC (=) : 24V (Andere Spannungen auf Anfrage.)

Elektrische Ausführung

Schutzart

Spannungen

Vorsatz	Stromaufnahme (mA)	Nennleistung				Umgebungs- temperatur (Magnet) (°)	Ersatz- spule (=)	Typ (1)
		Anzug (VA)	Halten (VA)	Warm/kalt (W)	Warm/kalt (W)			
SC	100 - 500	-	-	-	11 / 8	-10 bis 75	400429-040	01

Regelbereich

0 - 24 V DC
24 V DC Pulsweitenmodulation (300 Hz)
Hysterese < 5 % ; Reproduzierbarkeit < 3 % ;
Ansprechempfindlichkeit < 2 %

Durchflussregulierungswerte (2)

KENNDATEN

An- schluss	Nenn- weite	Durchfluss- koeffizient Kv			Betriebsdruckdifferenz (bar)			Mag- net- lei- stung (W)	Artikel-Nr.				Optionen		
					min.	max.			Luft, Wasser, Öl (*)	Messing (=)	Edelstahl (=)		EPDM	CR	PTFE
						Vakuum									
						=	=								
(mm)		(m³/h)	(l/min)	=	=	=	Luft / Gas	Flüssigkeiten	Luft / Gas	Flüssigkeiten					
NC - Normal geschlossen															
1/4	G	1,2	0,05	0,8	0	1	16	8	SCG202A001V	SCG202A051V	-	-	E	J	T
	NPT	2,4	0,12	2	0	1	8	8	SCG202A002V	SCG202A052V	-	-	E	J	T
	G	3,2	0,24	4,0	0	1	4	8	SCG202A003V	SCG202A053V	-	-	E	J	T
	NPT	4,0	0,42	7,0	0	1	2,5	8	SCG202A004V	SCG202A054V	-	-	E	J	T
	G	5,6	0,72	12,0	0	1	1,4	8	SCG202A006V	SCG202A056V	-	-	E	J	T
	NPT	7,1	0,90	15,0	0	1	1	8	SCG202A007V	SCG202A057V	-	-	E	J	T
	G	3,2	0,24	4,0	0	1	4	8	SCE202A023V	SCE202A073V	-	-	E	J	T
	NPT	4,0	0,42	7,0	0	1	2,5	8	SCE202A024V	SCE202A074V	-	-	E	J	T
3/8	Rp	5,6	0,72	12,0	0	1	1,4	8	SCE202A026V	SCE202A076V	-	-	E	J	T
	NPT	7,1	0,90	15,0	0	1	1	8	SCE202A027V	SCE202A077V	-	-	E	J	T
	Rp	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	NPT	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(1) Siehe Maßzeichnungen auf der folgenden Seite.

(2) Bei Minustemperaturen können durch das Gefrieren des Mediums Schäden am Ventil entstehen.

Maximaler Wert in Prozent bei 24 V DC-Spannungsversorgung und Pulsweitenmodulation (300 Hz), Versorgung bei konstanter Druckdifferenz ΔP.

ASCO®
JOUCOMATIC

Weitere Informationen unter www.ascojoucomatic.de

V115-1

00021DE-2006/R01



PROPORTIONALVENTIL BAUREIHE 202

SONDERAUSFÜHRUNGEN

- Die Ventile sind ebenfalls mit Dichtungen und Sitzdichtungen aus NBR (Nitril), EPDM (Äthylen-Propylen) CR (Chloropren / Neoprene) und PTFE erhältlich.
 - Wasserdichtes Gehäuse mit integriertem Magnet und Schraubklemmen gemäß CEE-10, IP67.
 - Exgeschützte Gehäuse für den Einsatz in den Zonen 1/21-2/22, Kategorien 2-3, gemäß ATEX-Richtlinie 94/9/EG auf Anfrage.
 - Elektrische Gehäuse gemäß den NEMA-Normen.
 - Montagebügel.
 - Steckerverstärker für die proportionale Regelung (Artikel-Nr.: **E908A001**, siehe V150)
- Merkmale:**
- Eingangssignal für die Regelung - analog: 0 - 10 V DC, 0 - 20 mA oder 4 - 20 mA.
 - Stromzufuhr für den Magnet einstellbar (= Durchfluss) entsprechend den gewünschten Regelsignalen.
 - Schließfunktion des Ventils, sobald das Regelsignal 2% unterschreitet.
 - Einstellbare Rampenfunktion.
 - Einstellbare Frequenz.
 - Ausgangsstrom unabhängig vom Magnetwiderstand und von Schwankungen in der Versorgungsspannung.
 - Einbau: Gehäuse mit Leitungsdose gemäß ISO 4400 / IP65.
 - Andere Rohranschlüsse auf Anfrage.

INSTALLATION

- Die Ventile können ohne Beeinträchtigung der Funktion in jeder beliebigen Einbaulage montiert werden.
- Die Ventilgehäuse aus Messing und Edelstahl/NPT 3/8 sind mit 2 Montagebohrungen versehen.
- Die Ventilgehäuse aus Edelstahl/NPT 1/4 werden mit Montagebügel geliefert.
- Gewindeanschluss: E = Rp (ISO 7/1) ; G = G (ISO 228/1) ; B = NPT (ANSI 1.20.3)
- Montage- und Wartungsanweisungen sind jedem Ventil beigelegt.

BESTELLBEISPIELE/VENTILE

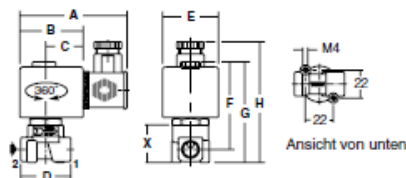
SC	G	202	A	001	V	24V / DC
SC	B	202	A	011	V	24V / DC
Vorsatz						Spannung
Anschluss						Zusatz
Artikel-Nr.						

ABMESSUNGEN (mm), GEWICHTE (kg)

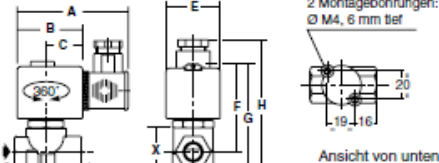


TYP 01
Magnet mit Vorsatz "SC"
Kunststoffspritzguss
IEC 335 / ISO 4400
IP65

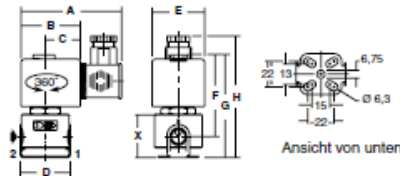
SCG202A001V/002V/003V/004V/006V/007V
SCB202A051V/052V/053V/054V/056V/057V



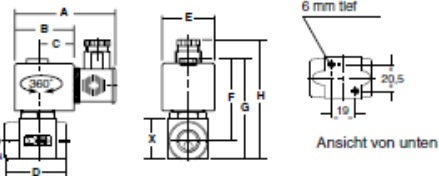
SCE202A023V/024V/026V/027V
SCB202A073V/074V/076V/077V



SCG202A011V/012V/013V/014V/016V/017V
SCB202A061V/062V/063V/064V/066V/067V



SCB202A033V/034V/036V/037V
SCB202A083V/084V/086V/087V



Typ	Vorsatz	Artikel-Nr.	A	B	C	D	E	F	G	H	X	Gewicht ⁽¹⁾
01	SC	SCG202A001V/002V/003V/004V/006V/007V/051V/052V/053V/054V/056V/057V	85	50	30	40	45	60	78	95	30	0,50
		SCG202A011V/012V/013V/014V/016V/017V/061V/062V/063V/064V/066V/067V	80	50	30	42	45	60	79	95	37	0,60
		SCE202A023V/024V/026V/027V/073V/074V/076V/077V	80	50	30	48	45	68	82	97	32	0,50
		SCB202A033V/034V/036V/037V/083V/084V/086V/087V	80	50	30	51	45	68	81	97	31	0,65

⁽¹⁾ Einschl. Magnet und Leitungsdose

Weitere Informationen unter www.ascojoucomatic.de

V115-2



000110E-20201/01
Änderung an vorbehalten.

Anhang D: Datenblatt ASCO Steckerverstärker

ASCO®**STECKERVERSTÄRKER**für die proportionale Regelung
von POSIFLOW-MagnetventilenBaureihe
908**MERKMALE**

- Umwandlung der analogen Regelsignale in den Magnetstrom durch Pulsbreitenmodulation.
- Schließfunktion des Ventils, sobald das Regelsignal 2 % unterschreitet
- Einstellbare Zeitrampe.
- Die Stromversorgung für den Magnet ist unabhängig vom Magnetwiderstand und von Schwankungen in der Versorgungsspannung.
- Der minimale und maximale Versorgungsstrom für den Magnet ist in Abhängigkeit von den Regelsignalen einstellbar.
- Der elektronische Regelkreis ist in eine Leitungsdose integriert, die an einen Magnet mit 3 Steckerfahnen gemäß ISO 4400/ EN 175301-803, Bauform A, DIN 43650, 11 mm, Industriestandard B oder DIN 43650, 9,4 mm, Industriestandard B

ALLGEMEINES

Nennspannung 24 V DC
Max. Stromaufnahme 1100 mA

KONSTRUKTIONSMERKMALE

Gehäuse PA
Deckel PA
Schraube verzinkter Stahl
Dichtungen NBR

ELEKTRISCHE DATEN**Elektrischer Anschluss**

Leitungsdose (Kabel-Ø 6-10 mm)
ISO 4400 / EN 175301-803, Bauform A ⁽²⁾
Magnet mit 3 Steckerfahnen

Magnetventilanschluss

Steckerverstärker E908A001
Steckerverstärker E908A003
Steckerverstärker E908A004
gemäß ISO 4400 / EN 175301-803, Bauform A
gemäß DIN 43650, 11 mm, Industriestandard B
gemäß DIN 43650, 9,4 mm, Industriestandard B,
mit konfektioniertem Kabel, 200 mm lang

Elektrische Ausführung**Schutzart**

IEC 335
IP65 (EN 60529)
DC (=) : 24V ±10 % (U_N), max. 10% Restwelligkeit

Versorgungsspannung

Vor- satz	Max. Strom bei Vollast (I _N)	Eingangsregelsignal (umschaltbar)		Eigenverbrauch (elektronischer Teil)		Umgebungs- temperatur ⁽²⁾	Typ ⁽¹⁾
	(mA)	U _s (V)	I _{cx} (mA)	I _c (mA)	(W)		
-	1100	0 - 10	0 - 20	4 - 20	0,8	-10 bis 75 (°C)	01 - 02

Schließfunktion < 2 % des maximalen Regelsignals

Minimaler Strom Upwm 15 - 50 % E.D.

Maximaler Strom Upwm 30 - 100 % E.D.

Zeitrampe wahlweise EIN/AUS,
einstellbar von 0,1 bis 3 Sekunden

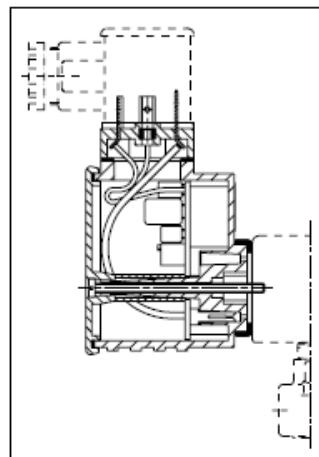
Einstellbare Schaltfrequenz 40 - 700 Hz

KENNDATEN

Artikel-Nr.s: Proportionalventile für Steckerverstärker	Typ	Artikel-Nr.: Steckerverstärker
202A001V bis 202A087V 203B001V und 203B002V	01	E908A001
202A201V bis 202A208V	02	E908A003
202A101V bis 202A104V 202A105V bis 202B108V	01	E908A004

⁽¹⁾ Siehe Maßzeichnungen auf der folgenden Seite.

⁽²⁾ Leitungsdose im Lieferumfang enthalten. Der am POSIFLOW-Magnetventil angebrachte Standard-Steckverbinder ist nicht zu verwenden.

**4**



STECKERVERSTÄRKER FÜR POSIFLOW-MAGNETVENTIL BAUREIHE 908

SONDERAUSFÜHRUNGEN

- Anpassungen oder Änderung des Steckerverstärkers nach Kundenspezifikationen möglich.

INSTALLATION

- Der Steckerverstärker kann ohne Beeinträchtigung der Funktion in jeder beliebigen Einbaulage montiert werden.
- Leitungsdose gemäß ISO 4400 / EN 175301-803, Bauform A, im Lieferumfang enthalten.
- Artikel-Nr. E908A004: Leitungsdose mit 4 Steckerfahnen gemäß ISO 4400 / EN 175301-803, Bauform A, im Lieferumfang enthalten. Ausgang zum Ventil mit konfektioniertem Kabel 200 mm lang mit Leitungsdose gemäß DIN 43650, 9,4 mm, Industriestandard B.
- Montage- und Wartungsanweisungen sind jedem Steckerverstärker beigelegt.

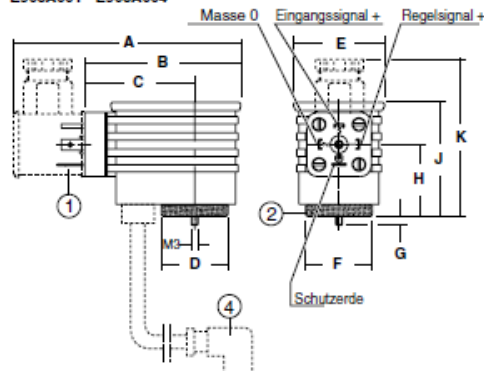
ABMESSUNGEN (mm), GEWICHTE (kg)



TYP 01

Steckerverstärker für POSIFLOW
IEC 335 / ISO 4400
IP65

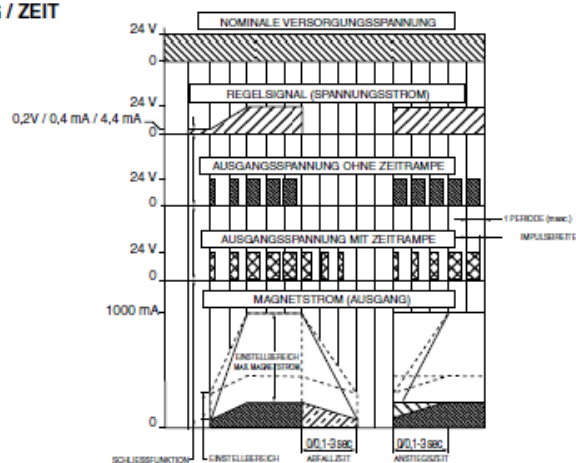
E908A001 - E908A004



Typ	Artikel-Nr.	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	Gewicht (1)
01	E908A001/004	98	70	48	30	41	30	4	32	51,5	70	0,1
02	E908A003	98	70	48	32	41	23	4	61	80	98	0,1

(1) Gewicht ohne Leitungsdose.

DIAGRAMM STROM - SPANNUNG / ZEIT



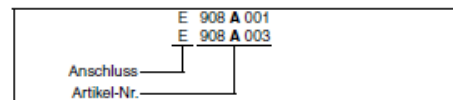
Weitere Informationen unter www.ascojouiomatic.de

X006-04-16



00064DE-2008/101
Änderung vorbehalten.

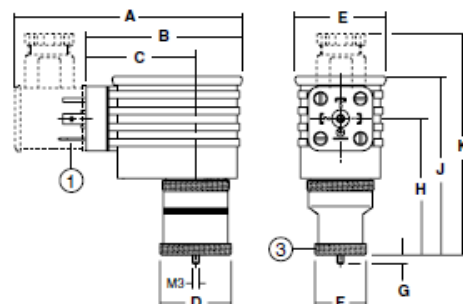
BESTELLBEISPIELE/VENTILE



TYP 02

Steckerverstärker für POSIFLOW
IEC 335 / ISO 4400
IP65

E908A003



① Versorgung, 4 Steckerfahnen, ISO 4400/EN 175301-803, Bauform A

Magnetventilanschluss:

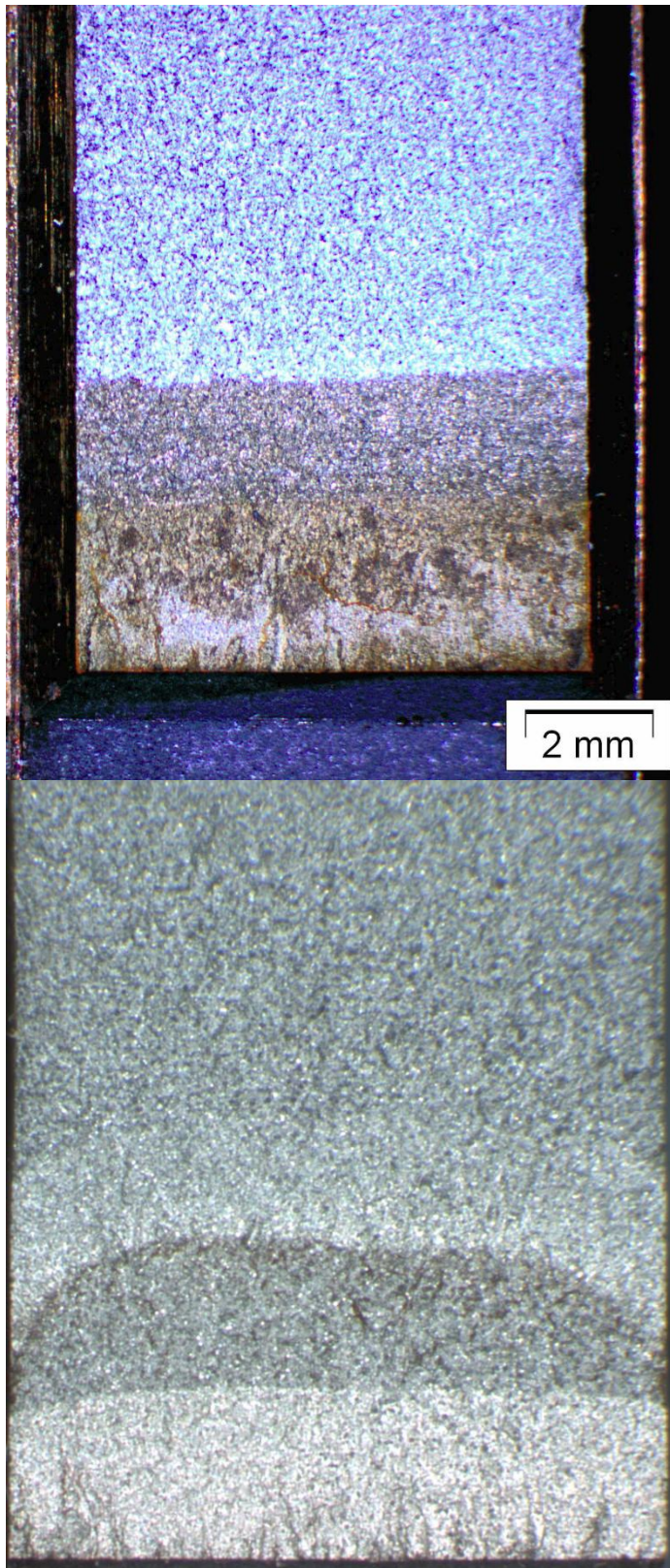
② 3 Steckerfahnen, ISO 4400/EN 175301-803, Bauform A

③ 3 Steckerfahnen, DIN 43650, 11 mm, Industriestandard B

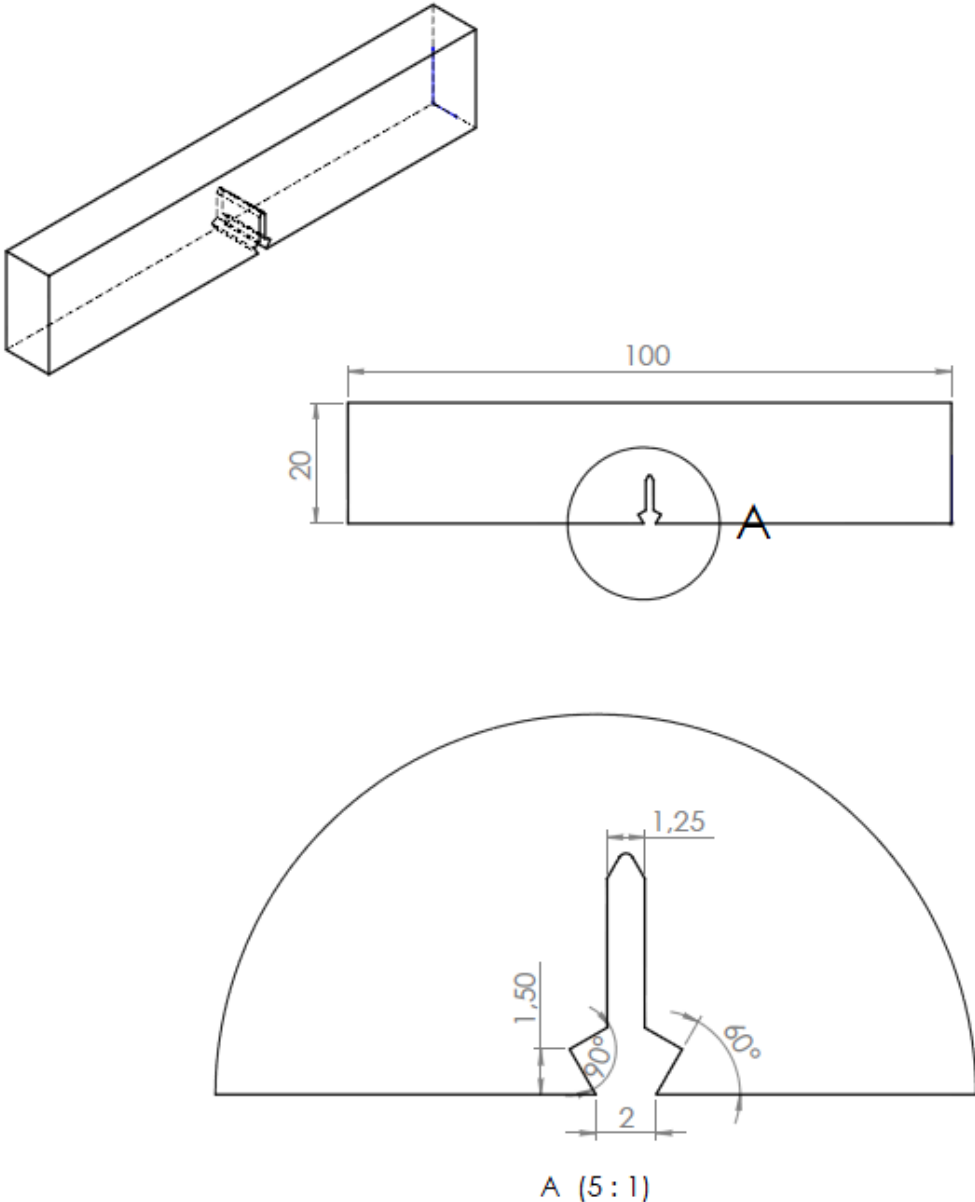
④ 3 Steckerfahnen, DIN 43650, 9,4 mm, Industriestandard B

Anhang E: Bilder der Bruchfläche

Vergleich der Bruchbilder mit Seitenkerben (oberes Bild, 5/K-B11) und ohne Seitenkerben (unteres Bild, 5/S-B4).



Anhang F: SENB-Probe Kerbe COD-Clip



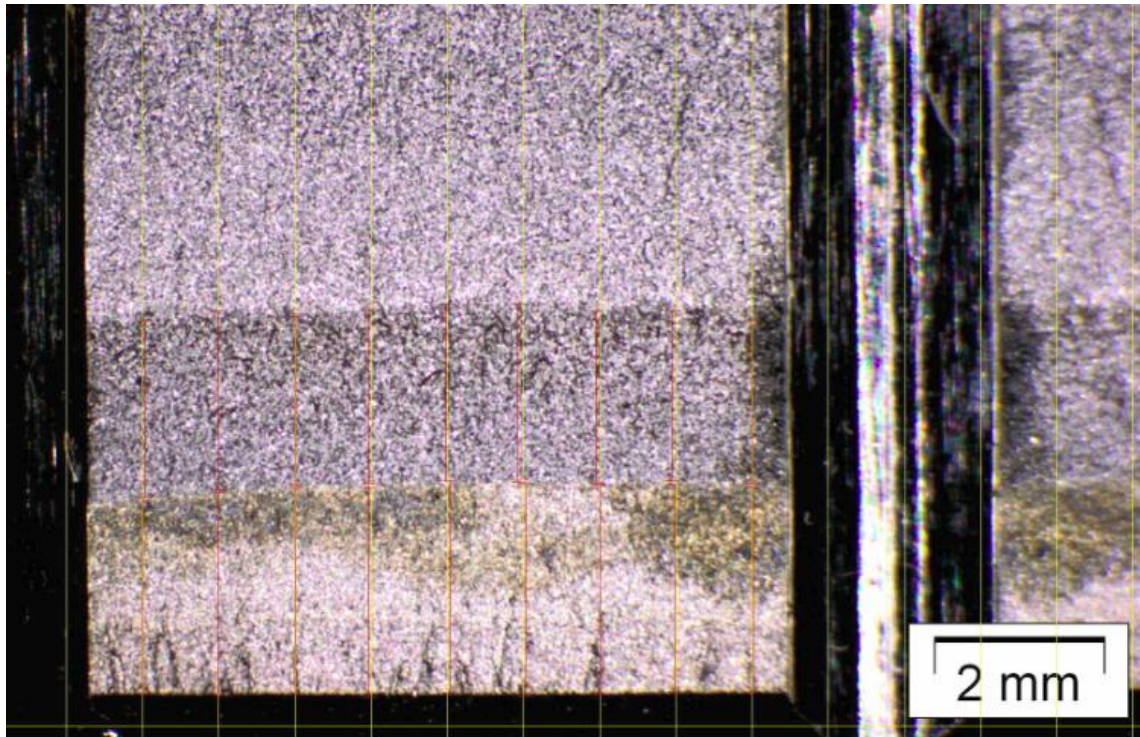
(Verwendungsbereich)		(Zul. Abw.)	(Oberfl.)	Maßstab	(Gewicht)
		Klasse		1:1	
		DIN ISO 2768		(Werkstoff Halbzeug)	GJS 800-8_GJS 1000-5_GJS 1200-3
				(Rohteil-Nr.)	Bezeichnung
				(Modell- oder Gesenk-Nr.)	Bezeichnung
		Datum	Name	SENB-Probe	
		Bearb.	24.08.10 Mannigel		
		Gepr.	00.00.00 Name		
		Norm			
		Hochschule Mittweida			000.000.001
					Blatt 1
					Blätter
Zust.	Änderung	Datum	Name	Ursprung	beschn.
		Ersatz für:			Ersatz durch:

Anhang G: Versuchsparameter des Teilentlastungsverfahrens

Werkstoffkennwerte	GJS-800-8	GJS-1000-5	GJS-1200-3
Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]	800	1000	1200
0,2%-Dehngrenze R_e [N/mm ²]	500	700	850
E -Modul [GPa]	170	168	167
Poisson-Zahl ν	0,27	0,27	0,27
Probengeometrie	GJS-800-8	GJS-1000-5	GJS-1200-3
Probenhöhe W [mm]	20	20	20
Probenbreite B [mm]	10	10	10
Probenbreite zwischen Seitenkerben B_n [mm]	8	8	8
Risslänge a_0 [mm]	abhängig von zykl. Anriss		
Länge mech. Kerb $a_{notched}$ [mm]	8	8	8
Rollenabstand S [mm]	80	80	80
Messschneidendicke X [mm]	2	2	2
Abbruchkriterien	GJS-800-8	GJS-1000-5	GJS-1200-3
Risslänge a [mm]	12...13	12...13	12...13
Durchbiegung f [mm]	5	5	5

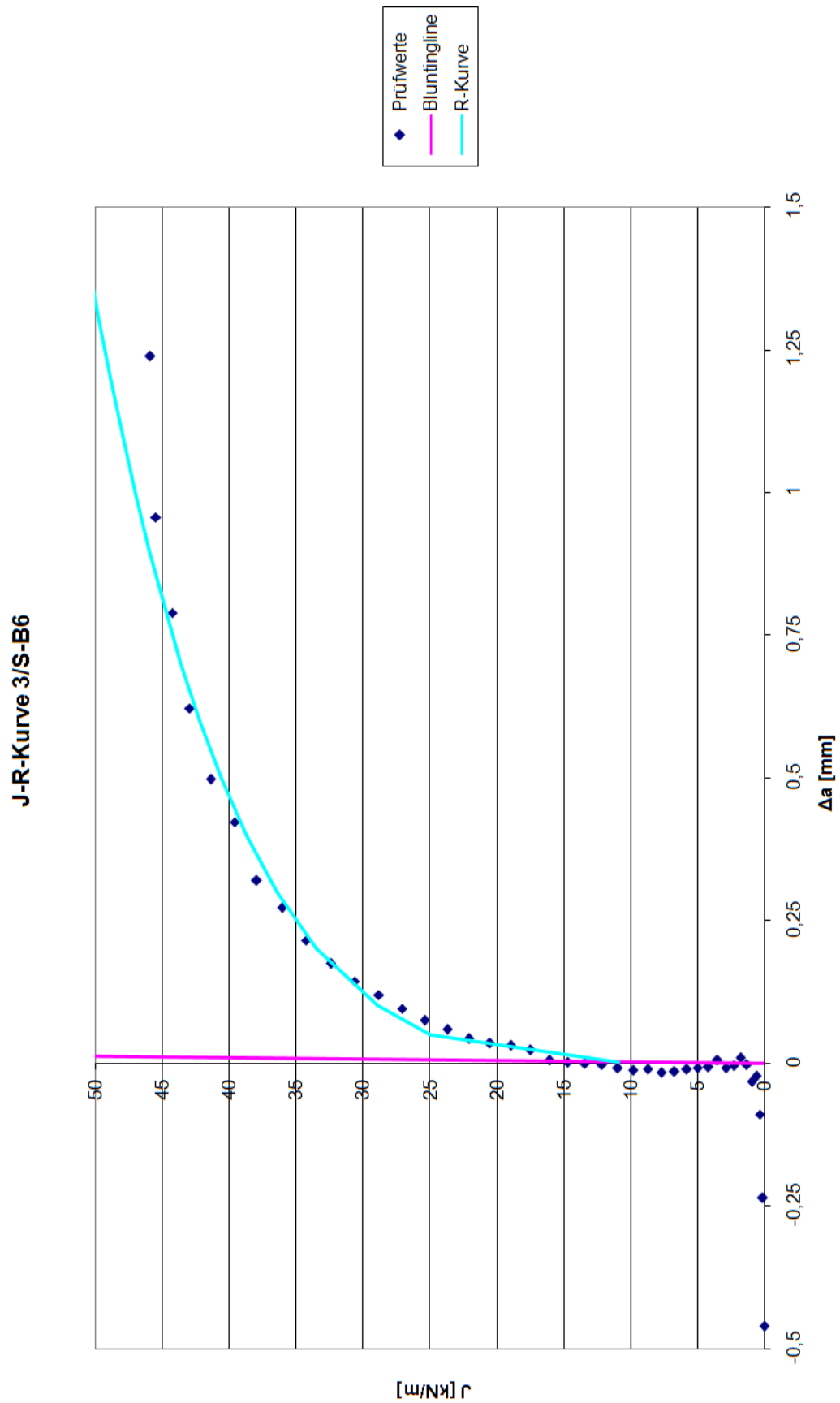
Anhang H: Raster für Bruchflächen-/ Risslängenvermessung

Beispiel: 3/K-B7

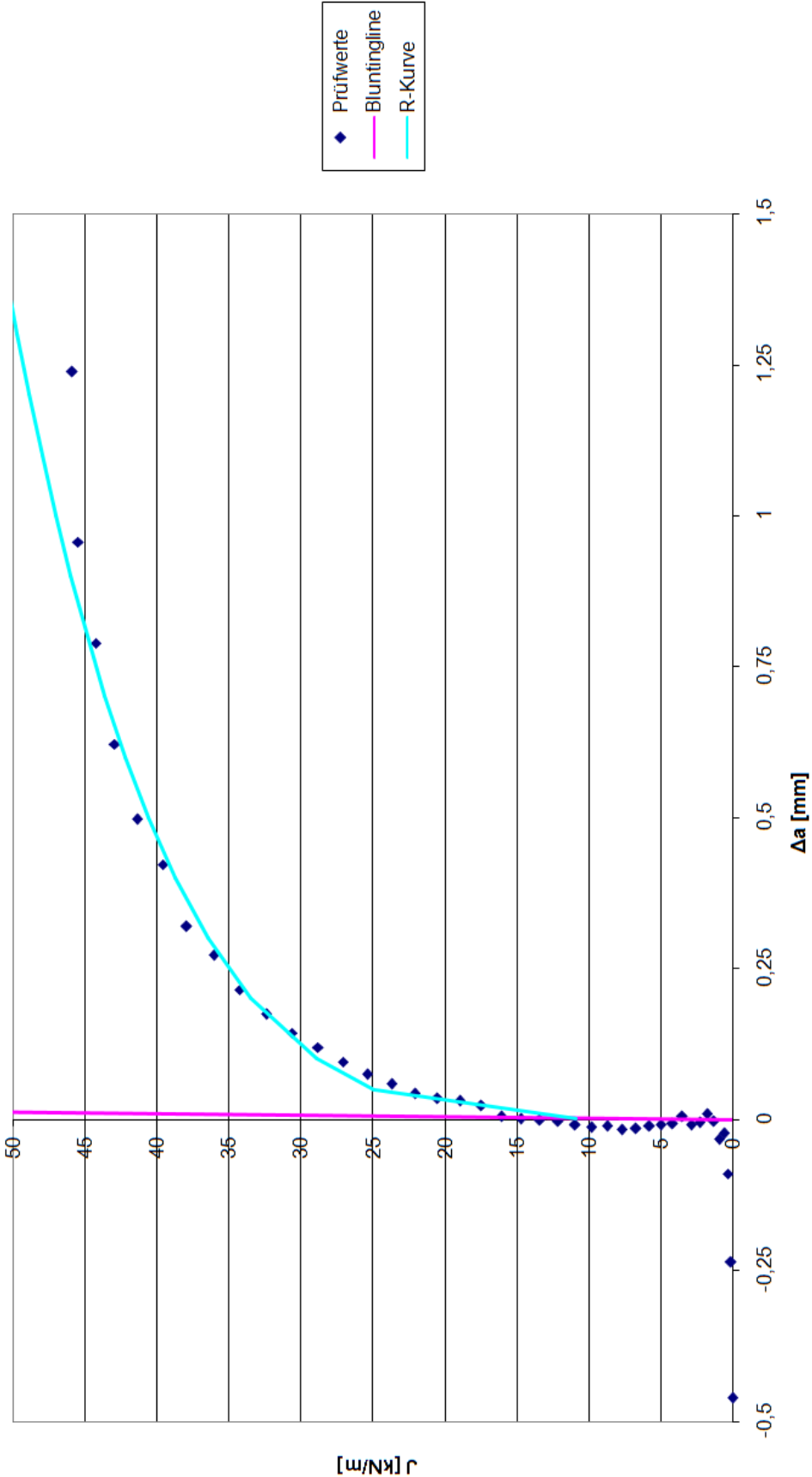


Anhang I: J - Δa - und δ - Δa -Kurve

Beispiel: 3/S-B6



J-R-Kurve 3/S-B6



Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, 11.April 2011

.....

Christian Mannigel